INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Abril 2015 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

FARMACOLOGÍA
Regreso a las plantas medicinales

INGENIERÍA
Nuevos materiales programables

SALUD
La batalla contra el ébola

AGUJEROS NEGROS Y MUROS DE FUEGO | 25 AÑOS DEL HUBBLE | LA BATALLA CONTRA EL ÉBOLA

MUROS DE FUEGO

Una nueva visión de los agujeros negros obliga a repensar la relatividad general y la mecánica cuántica

ARTÍCULO ESPECIAL
El Hubble cumple 25 años
SU LEGADO CIENTÍFICO EN IMÁGENES

N.º 463

ABRIL 2015



6,90 EUROS

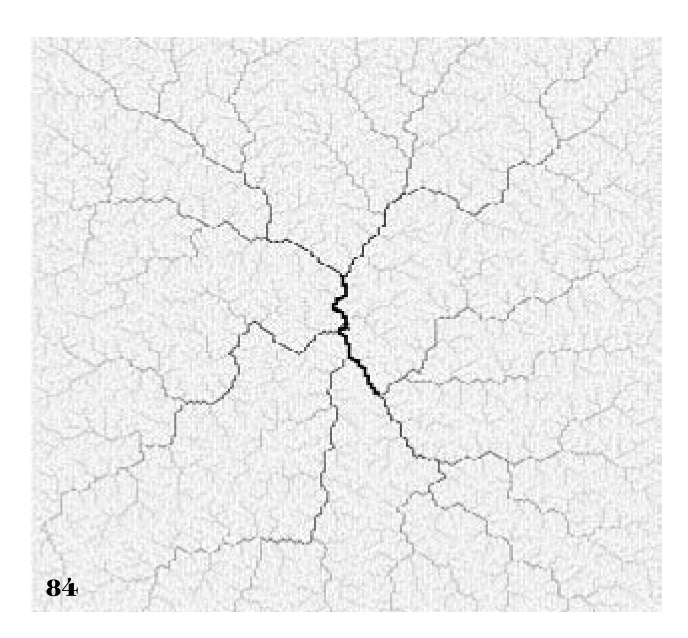


ARTÍCULOS

WIKIMEDIA COMMONS/B. NAVEZ/CC BY SA 3.0







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

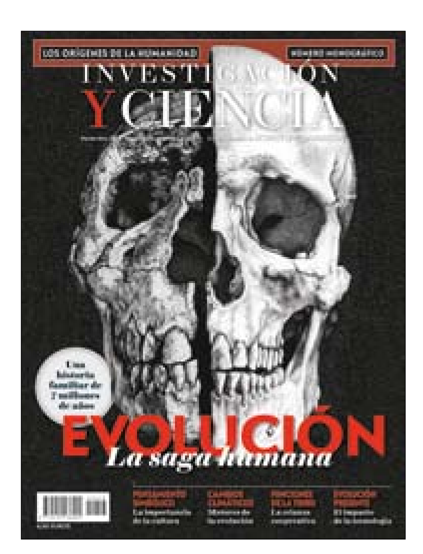
SECCIONES

EN PORTADA



Según la teoría de la relatividad, el horizonte de sucesos de un agujero negro no debería estar marcado por ninguna señal especial. Hace tres años, sin embargo, un grupo de investigadores observó que las leyes cuánticas parecían exigir justo lo contrario: que todo objeto que intentase atravesar el horizonte debería incinerarse al instante. Desde entonces, la idea ha suscitado un acalorado debate entre los físicos teóricos. Imagen de Kevin Brown, Mondolithic Studios.

redaccion@investigacionyciencia.es



Noviembre 2014

POBLACIONES Y EVOLUCIÓN

En el número monográfico sobre evolución humana [Investigación y Ciencia, noviembre de 2014], dos artículos parecen contradecirse.

En «A golpe de suerte», Ian Tattersall afirma lo siguiente: «Para que una población adopte una innovación sustancial —ya sea genética o cultural—, su tamaño debe ser reducido. Las comunidades grandes y muy densas arrastran demasiada inercia genética, lo que les impide cambiar de manera constante en una misma dirección». Sin embargo, en «El futuro de la evolución humana», John Hawks sostiene que «el rápido y enorme crecimiento demográfico de nuestros antepasados les concedió muchas más oportunidades».

Mel Tremper
Berwyn Heights, Maryland

Responden los editores: *Aunque las explicaciones de Tattersall y Hawks puedan parecer contradictorias, una y otra se refieren a escenarios evolutivos distintos.*

El artículo de Tattersall se centra en la evolución de pequeñas poblaciones de homininos que vivían aisladas unas de otras y en entornos diferentes. En tales condiciones, los cambios genéticos y culturales aleatorios (tanto beneficiosos como neutrales) pudieron acumularse con rapidez. Ello condujo a dichas poblaciones a diferenciarse y, en última estancia, a separarse en especies distintas.

Por su parte, el artículo de Hawks trata sobre los cambios genéticos adaptativos en las grandes poblaciones de Homo sapiens. *Las comunidades de gran tamaño se caracterizan por un mayor número de emparejamientos, lo que incrementa la probabilidad de que surjan cambios genéticos beneficiosos. Ello habría facilitado que nuestra especie se adaptase a los nuevos entornos que encontró al salir de África y expandirse por el resto del mundo.*

¿DOS CULTURAS?

En su artículo sobre la génesis del alejamiento entre la ciencia y la filosofía [«Cuando la ciencia se separó de la filosofía»; Investigación y Ciencia, marzo de 2015], Juan Arana ofrece cumplidas referencias sobre cómo ocurrió históricamente una separación que, con el paso del tiempo, tiende a aumentar.

Es probable que la divergencia entre ambos saberes sea el tributo que haya que pagar con motivo de la especialización, exigible en cada rama del conocimiento para alcanzar las máximas cotas de eficiencia. El problema es que, a cambio de esa eficiencia, puede estar perdiéndose una visión más profunda del ser humano y sus circunstancias. Una que se encuentra en la base de las grandes preguntas que seguimos haciéndonos: por qué existimos, hacia dónde vamos, etcétera.

Hoy en día, cualquier filósofo que no posea un conocimiento científico algo más que básico estará especulando desde una fantasía estéril. Asimismo, el científico que en su trabajo cotidiano no incorpore un *ethos* que vaya más allá de la pura deontología profesional y que ponga en consideración, en primer término, el respeto a la dignidad del hombre y su entorno natural estará sentando las bases de una peligrosa razón instrumental.

Para que el conocimiento humano realmente progrese y no solo crezca, parece imprescindible que científicos naturales, sociales y filósofos trabajen para resolver este serio problema de desencuentro —y, en muchos casos, incluso rivalidad— entre las ciencias y las humanidades. Para ello, es necesario que las rígidas paredes que separan a una y otra forma de conocimiento sean más porosas y se «contaminen» mutuamente sin ningún temor.

Horacio Torvisco Pulido
Alcobendas, Madrid



Marzo 2015

Errata corrige

En el artículo **En el estudio de audición** [por Katharine Gammon; Investigación y Ciencia, noviembre de 2014] se sitúa incorrectamente la Universidad McMaster en Toronto. Dicho centro se encuentra en Hamilton, Ontario.

En **El comportamiento anómalo de la corriente en chorro** [por Jeff Masters; Investigación y Ciencia, febrero de 2015], en la página 54 se definen las ondas de Rossby como ondulaciones de la corriente en chorro que tardan entre tres y cinco días en cruzar Estados Unidos. En realidad, las ondulaciones que proceden en esa escala de tiempo son las «ondas cortas», una clase de ondulaciones menores que forman parte de las ondas de Rossby. También en la página 54, donde se dice «las ondulaciones de la corriente en chorro se amplificaron y trazaron curvas muy pronunciadas», debería leerse «las ondas de Rossby se amplificaron y trazaron curvas muy pronunciadas». Por último, en la página 58, en el párrafo anterior a «Disputa científica», «ondas de Rossby» debería reemplazarse por «ondas cortas».

Estos errores han sido corregidos en la edición digital de los artículos correspondientes.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



¿RESIDEN LOS RECUERDOS fuera o dentro de las neuronas?

ISTOCKPHOTO

NEUROCIENCIA

La persistencia de la memoria

Tan intangibles como parecen, los recuerdos tienen una sólida base biológica. Según los manuales de neurociencia, se forman cuando un conjunto de neuronas adyacentes envían señales químicas a través de las sinapsis, o uniones, que las conectan. Cada vez que rememoramos algo, la conexión se reactiva y se refuerza. La idea de que las sinapsis custodian los recuerdos ha dominado la neurociencia desde hace más de un siglo, pero un nuevo estudio de la Universidad de California en Los Ángeles podría desbancar esa noción: los recuerdos residirían en el *interior* de las neuronas. Si el trabajo es secundado, podría tener una gran repercusión en el tratamiento del trastorno por estrés postraumático (TEPT), el cual se caracteriza por recuerdos dolorosamente vívidos e inapropiados.

Hace más de una década se inició el estudio del propranolol como tratamiento del TEPT. Se pensaba que este fármaco impedía la formación de recuerdos a través del bloqueo de la producción de las proteínas que aseguran la retentiva a largo plazo. Por desgracia, la investigación no tardó en encontrarse con escollos: si no se administraba justo después del trauma, resultaba ineficaz. En tiempo reciente, los investigadores han intentado eludir este problema: todo apunta a que, cuando alguien rememora un recuerdo, no solo se refuerza la conexión reactivada sino que permanece temporalmente expuesta al cambio, un proceso bautizado como reconsolidación de la memoria. La administración de propranolol durante ese intervalo (y teóricamente la terapia, la estimulación eléctrica y otros tipos de fármacos) permitiría bloquear la reconsolidación y acabar con la sinapsis en el acto.

La posibilidad de depurar recuerdos llamó la atención de David Glanzman, neurobiólogo de UCLA, que se dispuso a

estudiar el proceso en *Aplysia,* una babosa marina empleada como modelo en neurociencia. Glanzman y su equipo propinaron pequeñas descargas eléctricas a ejemplares de *Aplysia*, creando un recuerdo del evento en forma de nuevas sinapsis en el cerebro. Acto seguido, transfirieron las neuronas del molusco a una placa de Petri, desencadenaron químicamente el recuerdo de las descargas y, justo después, aplicaron una dosis de propranolol.

En un principio el fármaco pareció confirmar lo que se sabía y eliminó la conexión sináptica, pero cuando las células quedaron expuestas al recuerdo de las descargas, este revivió con toda intensidad en 48 horas. «Se había restablecido plenamente», explica Glanzman. «Y eso significa que la memoria no se almacena en las sinapsis.» Los resultados han sido publicados en la revista de acceso abierto *eLife*.

Si la memoria no radica en las sinapsis, ¿dónde entonces? Un examen más atento de las neuronas reveló que, aun después de eliminar las sinapsis, los cambios moleculares y químicos persistían después de la descarga inicial en el interior de la neurona. El engrama, o huella mnemónica, podría quedar conservado por esos cambios permanentes. Otra explicación lo situaría codificado en modificaciones del ADN celular que alterarían la expresión de genes concretos. Glanzman y otros se inclinan por esta última idea.

Eric R. Kandel, neurocientífico de la Universidad de Columbia y premio nóbel de fisiología y medicina en el año 2000 por sus trabajos sobre la memoria, advierte de que los resultados se observaron en las primeras 48 horas posteriores al tratamiento, momento en que la consolidación todavía es sensible.

Pese a ser preliminares, los resultados sugieren que el consumo de pastillas quizá no ayude a las personas con TEPT, pues no borrarían los recuerdos dolorosos. «Si hace dos años me hubieran preguntado si se podría tratar la TEPT con bloqueo farmacológico, habría respondido que sí, pero que aún tardaría», dice Glanzman. En el lado positivo, añade, la idea de que los recuerdos persisten arraigados en las neuronas suscita nuevas esperanzas para otra enfermedad ligada a la memoria, el alzhéimer.

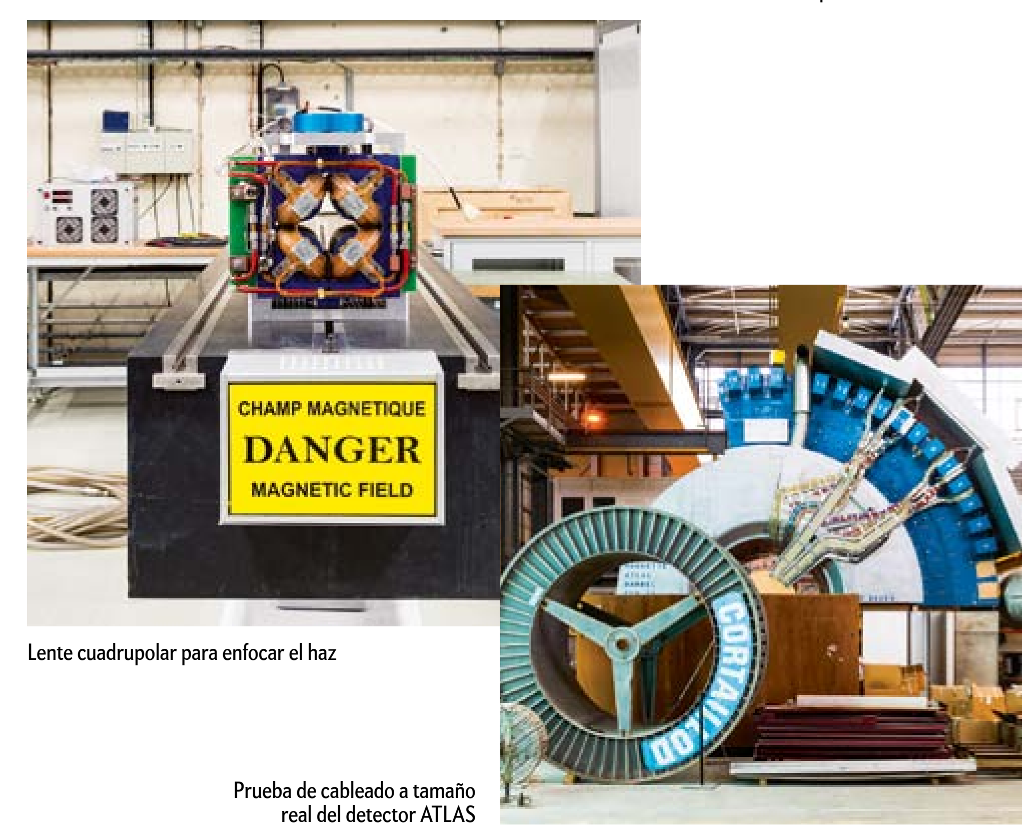
—Roni Jacobson

FÍSICA

El LHC reanuda sus experimentos

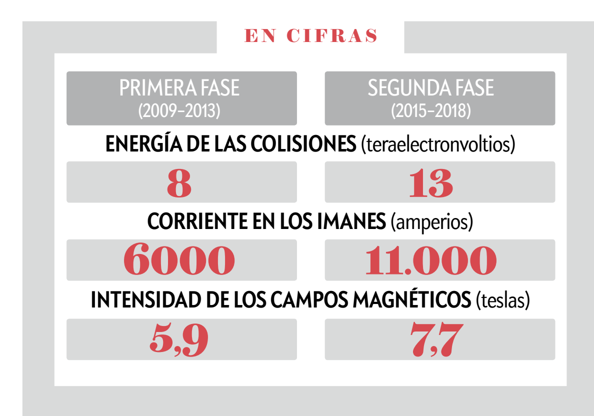
Después de una parada de dos años y tras una inversión de 146 millones de euros en mejoras técnicas, el mayor acelerador de partículas del mundo arrancará nuevamente esta primavera. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, cuenta ahora con mejores conexiones entre sus imanes, gracias a lo cual podrán soportar campos magnéticos más intensos y hacer colisionar protones a una energía sin precedentes. El hallazgo de nuevas partículas podría aportar los primeros indicios de las anheladas teorías supersimétricas o de las que postulan dimensiones extra del espacio. Tal vez incluso aparezcan nuevos bosones de Higgs, más masivos que el descubierto en 2012. *—Clara Moskowitz*


Electroimán séxtuple

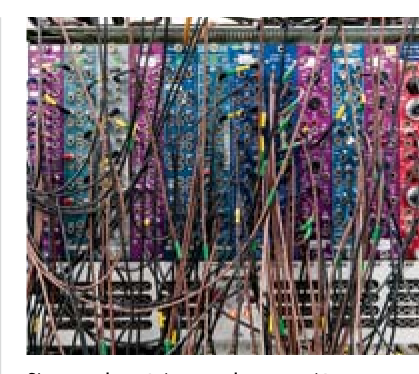


Lente cuadrupolar para enfocar el haz

Prueba de cableado a tamaño real del detector ATLAS


EN CIFRAS

	PRIMERA FASE (2009–2013)	SEGUNDA FASE (2015–2018)
ENERGÍA DE LAS COLISIONES (teraelectronvoltios)	8	13
CORRIENTE EN LOS IMANES (amperios)	6000	11.000
INTENSIDAD DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS (teslas)	5,9	7,7


Sistema electrónico para la protección de los imanes

ALASTAIR PHILIP WIPER (*fotografías*); FUENTE: FRÉDÉRICK BORDRY, DIRECTOR DE ACELERADORES Y TECNOLOGÍA EN EL CERN (*en cifras*)

ECOLOGÍA

Flores con sombras

En 1833, el naturalista alemán Constantin Lambert Gloger se percató de que el plumaje de las aves de climas cálidos era más oscuro que el de las propias de climas más fríos. Su aguda observación no tardó en ser bautizada como la regla de Gloger; los ornitólogos comprobaron que el plumaje tropical se oscurece con la cercanía al ecuador. Y los mamíferos parecen seguir idéntica pauta. Pero, ¿por qué la latitud influye en la coloración animal? Más de 180 años después es posible que la respuesta venga dada por un actor insospechado: las flores.

Los biólogos de la Universidad de Pittsburgh Matthew Koski y Tia-Lynn Ashman examinaron 34 poblaciones de argentina plateada (*Potentilla anserina*), una planta ampliamente distribuida en las zonas templadas de ambos hemisferios, y comprobaron que sus flores eran más oscuras cerca de los trópicos. En este caso, «más oscuras» significa que lucían «ojos de buey» más grandes, círculos oscuros rodeados por los pétalos más claros que son invisibles para el ojo humano y que solo resaltan bajo luz ultravioleta (UV) (*d*).

Los ojos de buey probablemente actúan como balizas para las abejas y otros insectos polinizadores capaces de percibir la luz UV. Pero Koski y Ashman hallaron más puntos oscuros que esos. En el laboratorio descubrieron que el polen de las flores oscuras tenía más posibilidades de germinar cuando estaba sometido a la dañina luz UV que el procedente de flores claras, dotadas de ojos de buey más pequeños. La pigmentación ejerce un efecto protector, según el estudio publicado en línea el pasado enero en la revista *Nature Plants:* cuanto mayor es el ojo de buey, más luz UV absorbe la flor y menos acaba incidiendo reflejada en el polen. La absorción es mayor en las plantas de latitudes bajas, que reciben una radiación UV más intensa.

El papel del tamaño del ojo de buey en la protección contra los rayos UV no descarta otros factores ambientales relacionados con la latitud. De este modo, los ornitólogos argumentan que la regla de Gloger es el resultado de un compuesto antibacteriano que protege las plumas en los húmedos trópicos y que oscurece el plumaje. Por lo que respecta a los mamíferos, los investigadores afirman que la luz cenital propia de las latitudes ecuatoriales favorece a las especies con la parte dorsal oscura y la frontal más clara, porque esa combinación facilita el camuflaje en la sombría selva tropical.

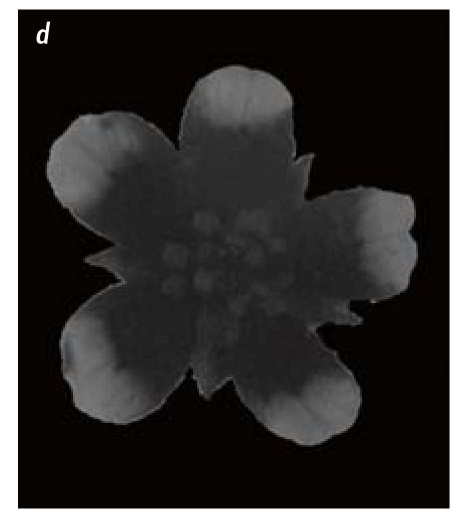
Sin embargo, a semejanza de las reglas, leyes y teoremas de la química y de la física, la ecología cuenta con axiomas generales que explican las pautas. Como su estudio traza un vínculo entre la radiación UV y la capacidad reproductora de las flores, Koski cree que la protección contra los UV acabará emergiendo como una de las razones clave de la pigmentación. Los UV dañan la estructura del ADN y de las proteínas vegetales y animales, por lo que la pigmentación oscura, visible o no, puede ser una estrategia adoptada por muchas especies contra la radiación solar nociva.

—Jason G. Goldman









ILUMINADAS CON LUZ UV, las flores de argentina plateada próximas al ecuador revelan zonas de pigmentación oscura más grandes (*d*) que las más alejadas (*b*).

CORTESÍA DE MATTHEW KOSKI, UNIVERSIDAD DE PITTSBURGH



EL CÚMULO DE COMA (*izquierda*) alberga galaxias tan difusas que, literalmente, palidecen en comparación con otras, como la espectacular galaxia del Sombrero (*arriba*).

ASTRONOMÍA

Galaxias fantasmagóricas

Aunque la palabra *galaxia* deriva de la voz griega para *leche*, algunas parecen más bien un producto lácteo muy desnatado. Una nueva batería de pequeños telescopios ha descubierto casualmente 47 galaxias ultradifusas, con estrellas tan separadas entre sí que el conjunto se muestra extremadamente tenue. Aunque varias de ellas tienen un tamaño similar al de la Vía Láctea, poseen un número de estrellas mil veces menor. Nadie sabe cómo pudieron originarse estos objetos.

Las extrañas galaxias fueron descubiertas con Dragonfly, un conjunto de ocho teleobjetivos Canon instalados recientemente en Nuevo México. «Simplemente no pudimos resistir la tentación de mirar hacia Coma», señala Roberto Abraham, astrónomo de la Universidad de Toronto. Situado a unos 340 millones de años luz de la Tierra, el cúmulo de Coma alberga miles de galaxias. Puede además presumir de un gran legado histórico: fue en él donde, en los años treinta, los astrónomos detectaron por primera vez materia oscura.

La imagen tomada por Dragonfly mostraba varias manchas tenues, indicativas de grandes galaxias difusas. Por pura suerte, el telescopio espacial Hubble había captado una de ellas en una observación independiente, lo que permitió estudiarla con más detalle. Las nuevas galaxias no se parecen en absoluto a la nuestra. Son suaves, redondeadas y carecen de gas con el que formar nuevas estrellas. Y aunque guardan algunas semejanzas con ciertas galaxias difusas conocidas como enanas esferoidales, son cualquier cosa menos pequeñas. El descubrimiento se describe en la edición de enero de *Astrophysical Journal Letters*.

¿Cómo se formaron estas galaxias tan tenues y difíciles de detectar? Pieter van Dokkum, astrónomo de la Universidad Yale y miembro del equipo que publicó el hallazgo, sospecha que podrían ser «vías lácteas fallidas»: grandes galaxias que iban camino de convertirse en objetos brillantes pero que, antes de que pudiesen engendrar un gran número de estrellas, perdieron el gas. Ello podría haber ocurrido como consecuencia de explosiones de supernova, las cuales habrían catapultado el gas hacia el exterior.

En cualquier caso, las nuevas galaxias han de albergar grandes cantidades de materia oscura, ya que de lo contrario no podrían mantenerse cohesionadas. Se ignora cuánta podrían contener, ya que por el momento los astrónomos no han logrado medir su masa. Pero, para Chris Impey, de la Universidad de Arizona, se antojan excelentes laboratorios. Si la materia oscura emitiese radiación, estas galaxias ultradifusas podrían ser el lugar ideal para verla. —*Ken Croswell*

CORTESÍA DE NASA/ESA/ESA/STScI/AURA Y EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE; SOCIEDAD REGIA DE LONDRES (*esquema de eclipses, 1665*)

AGENDA

CONFERENCIAS

16 de abril
La solución numérica de ecuaciones a principios del siglo XVII
Antonio Mellado Romero, Grupo PiCuadrado de Historia de las Matemáticas
Universidad de Murcia
www.um.es/prinum

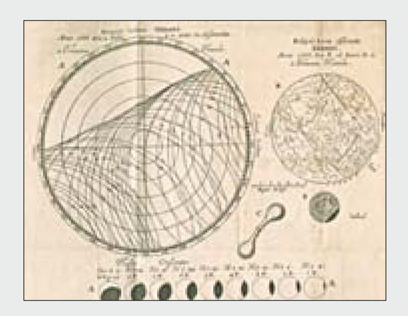
21 de abril
El descubrimiento de la expansión del universo
James E. Peebles, Universidad de Princeton
Fundación BBVA, Madrid
www.fbbva.es > Agenda

30 de abril
De las células madre a la terapia celular. ¿Son las células madre la medicina del futuro?
Flor María Pérez Campo, Universidad de Cantabria
Ciclo «Biotecnología para todos»
Universidad de Cantabria
Santander
www.unican.es/campus-cultural

EXPOSICIONES

A partir del 9 de abril
Arañas y escorpiones
Casa de la Ciencia, Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es

***Philosophical Transactions*: 350 años de publicación**
Sociedad Regia, Londres
https://royalsociety.org



OTROS

17 y 18 de abril - Jornadas internacionales sobre educación
STEAM Barcelona
Cosmocaixa, Barcelona
http://obrasocial.lacaixa.es

25 y 26 de abril - Hackatón
Science Hack Day Tenerife
Facultad de Bellas Artes
Universidad de La Laguna
Tenerife
www.tenerife.sciencehackday.org

EPIGENÉTICA

Erradicación de la memoria celular en embriones humanos

Dos estudios revelan que, en sus primeras fases de desarrollo, los embriones han perdido gran parte de las marcas metilo en el ADN, una modificación molecular que afecta a la transcripción de los genes

WOLF REIK Y GAVIN KELSEY

Las modificaciones epigenéticas son cambios en el genoma que pueden afectar a la expresión de los genes sin alterar la secuencia del ADN. Al igual que el propio ADN, suelen copiarse fielmente durante la división celular, lo que permite a las células hijas conservar la información epigenética heredada de sus progenitoras. Ello garantiza que la expresión génica se mantenga de forma estable en todos los linajes celulares. Una de estas modificaciones es la metilación, un proceso mediante el cual se añaden grupos metilo al ADN. En los embriones humanos, inmediatamente después de la fecundación existe una eliminación masiva de grupos metilo en la mayor parte del genoma. Se produce, por tanto, una pérdida de la memoria de la metilación, un paso de la reprogramación epigenética que parece ser crucial en los mamíferos.

La metilación del ADN reprime la transcripción y tiene lugar, principalmente, en las bases de citosina de los dinucleótidos formados por la secuencia citosina-guanina (CpG, donde la *p* hace referencia al grupo fosfato del esqueleto azúcar-fosfato del ADN, lo que indica que ambos nucleótidos se hallan en la misma hebra de ADN). Como el emparejamiento de bases de tipo Watson y Crick dictamina que en las hebras complementarias de ADN la C se empareja con la G, las secuencias CpG se hallan alineadas, de manera que las dos hebras están metiladas en el mismo lugar. Por consiguiente, los patrones de metilación se pueden transmitir durante la división celular gracias al «módulo de memoria» CpG. Esta herencia de información epigenética es vital para los linajes de células especializadas, que deben mantener su identidad a medida que se dividen; por ejemplo, las células sanguíneas en proceso de división mantienen su identidad epigenética para dar lugar a células hijas que también son sanguíneas.

Mediante técnicas de secuenciación a gran escala, los equipos de Hongshan Guo, de la Universidad de Pekín, y de Zachary D. Smith, de la Universidad Harvard, analizaron la metilación del ADN en el genoma de embriones humanos durante las etapas iniciales de desarrollo. Examinaron óvulos, espermatozoides, óvulos fecundados (zigotos) y embriones correspondientes a distintas fases, incluida la de blastocisto (justo antes de que el

PÉRDIDA Y RECUPERACIÓN DE LAS MARCAS EPIGENÉTICAS

El examen de espermatozoides, óvulos y embriones humanos ha puesto de manifiesto la distinta cantidad de grupos metilo en su ADN, unas marcas moleculares que regulan la expresión de los genes. El ADN de los espermatozoides está muy metilado, mientras que el de los óvulos lo está menos **1** (*el espermatozoide y el óvulo no se han dibujado a escala*). Pero una vez que el óvulo ha sido fecundado, los grupos metilo se pierden casi por completo, más en el genoma de origen paterno que en el de origen materno **2**. A medida que el embrión empieza a desarrollarse, y hasta alcanzar la etapa de blastocisto, las marcas siguen desapareciendo del genoma materno **3**. Tras esta fase, el ADN de las células que se están diferenciando se vuelve a metilar, lo que permite a las células especializadas transmitir a sus hijas las instrucciones sobre el control de la transcripción génica **4**.

embrión se implante en el útero) y una fase posterior a la implantación. Los dos grupos descubrieron que el ADN de los espermatozoides presentaba una abundante metilación, mientras que, en los óvulos, esta resultaba moderada. Sin embargo, los zigotos y los embriones formados por dos células habían perdido una gran parte de los grupos metilo. En concreto, el equipo de Guo observó una notable desmetilación del genoma paterno, procedente de los espermatozoides, en comparación con la desmetilación observada en el genoma materno, más modesta.

En la etapa de blastocisto, la metilación seguía siendo escasa. Ello se cumplía en todos los tipos celulares del blastocisto, incluidas las células de una estructura denominada «masa celular interna», que son pluripotenciales, es decir, pueden dan lugar a cualquier tipo de célula del organismo. Investigaciones previas indican que para que las células embrionarias adquieran pluripotencialidad deben desprenderse de la memoria epigenética, lo que proporcionaría una explicación sobre la desmetilación generalizada observada. Por el contrario, los dos grupos advirtieron que, después de la implantación, cuando las células habían empezado a adoptar la identidad específica de cada tejido, la metilación del ADN aumentaba con rapidez hasta alcanzar los niveles característicos de las células diferenciadas. Tras haber sido borrado casi por completo, el sistema de memoria epigenética recuperaba su lugar.

Estos resultados, junto con los obtenidos en ratones y otros mamíferos, sugieren que la reprogramación global de la metilación posterior a la fecundación es una característica que se ha conservado durante la evolución. Ello quizá se deba a que, durante las primeras fases del desarrollo, los embriones de mamífero experimentan una rápida activación de la transcripción, así como una diversificación temprana de los tipos celulares, factores que necesitan un estado pluripotencial transitorio. Destaca el hecho de que las cinéticas de desmetilación en ratones y en humanos se asemejen tanto, si se tiene en cuenta que otros aspectos de su desarrollo temprano están menos conservados. De este modo, en los embriones de los múridos, la principal activación transcripcional del genoma ocurre durante la fase en que están formados por dos células, mientras que en los humanos se produce durante la transición entre el embrión de cuatro células al de ocho.

Resulta fascinante el hecho de que Guo y sus colaboradores identificasen, sobre todo en el genoma paterno, una nueva forma de modificación epigenética, denominada hidroximetilación, que en los ratones se halla implicada en la desmetilación. Ello refuerza la idea de que, en los mamíferos, los principales mecanismos de reprogramación epigenética están conservados. Los estudios no profundizaron más en el proceso de desmetilación. En el caso de los embriones humanos, este tipo de análisis supone un reto, pero Smith y sus colaboradores han dado un primer paso en este sentido. Han cultivado in vitro células madre embrionarias pluripotenciales procedentes de blastocistos y han descubierto que las células se vuelven a metilar rápidamente. Este podría convertirse en un sistema viable para la manipulación y el estudio de la metilación y desmetilación en todo el genoma de embriones humanos, tal y como se hace en ratones.

Los análisis de la totalidad del genoma permiten conocer con detalle las regiones de la secuencia de ADN cuya función se sabe que es modificada por la metilación, con lo que puede investigarse su comportamiento durante la desmetilación global. Estas regiones incluyen los genes «con impronta», las regiones ricas en CpG, denominadas islotes CpG, y los transposones (secuencias de ADN que se pueden desplazar de un lado a otro del genoma).

Los genes con impronta son los que se expresan preferentemente a partir de uno de los cromosomas parentales (el materno o el paterno), al contrario de lo que ocurre en la mayoría de los genes, que pueden expresarse a partir de ambos cromosomas. De modo inusual, la memoria genética relativa a las secuencias con impronta se mantiene a lo largo todo el desarrollo. Los dos equipos han confirmado este hecho en embriones humanos, al descubrir que estos presentaban la metilación de sus progenitores en las regiones con impronta conservadas.

Los autores revelaron que, a diferencia de lo que sucede en los espermatozoides, los óvulos humanos contenían cientos de islotes CpG metilados diferentes a los detectados en óvulos de ratón; además, tanto en los embriones de los múridos como en los humanos, estas marcas epigenéticas maternas no solían conservarse bien tras la fecundación. Tal vez ello refleje una diferencia en el desarrollo de los óvulos entre ambas especies, la cual deja de ser relevante después de la fecundación. Otra posibilidad es que algunas de estas señales epigenéticas maternas se necesiten solo durante la fase temprana del embrión, lo que contribuiría a las distintas improntas de cada especie, sobre todo en la placenta.

Durante la reprogramación hay que tener cuidado con los transposones, ya que la desmetilación podría provocar su activación transcripcional. Si poseen un origen evolutivo reciente y casi no han experimentado mutaciones, podrían desplazarse de un lado a otro del genoma, lo que tal vez dé lugar a mutaciones no deseadas. Guo y sus colaboradores investigaron una clase de transposones, los elementos LINE, y descubrieron que los de origen reciente eran más resistentes a la desmetilación que sus homólogos más antiguos.

Los dos trabajos proporcionan un atlas de la reprogramación de la metilación en las primeras fases de los embriones humanos y, por consiguiente, un punto de partida para el estudio de la regulación epigenética del desarrollo humano. Ello resulta de vital importancia si queremos comprender los mecanismos epigenéticos que controlan la pluripotencialidad y la diferenciación. Los nuevos conocimientos también ayudarán a evaluar las consecuencias a largo plazo en la salud humana de las técnicas de reproducción asistida, entre ellas la fecundación in vitro.

—Wolf Reik y Gavin Kelsey
Instituto Babraham, Cambridge
y Centro para la Investigación
del Trofoblasto,
Universidad de Cambridge

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 511, págs. 540-541, 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

The DNA methylation landscape of human early embryos. T.-P. Guo y col. en *Nature*, vol. 511, págs. 606-610, 2014.
A unique regulatory phase of DNA methylation in the early mammalian embryo. Z. D. Smith y col. en *Nature*, vol. 484, págs. 339-344, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un nuevo tipo de herencia. Michael K. Skinner en *IyC*, octubre de 2014.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

El quark *cima* se pone en movimiento

El LHC está a punto de reanudar los experimentos. ¿Cómo aprovechar al máximo sus datos?

MARCEL VOS Y MIGUEL VILLAPLANA

Tras una parada técnica de dos años, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN se prepara estos días para reanudar sus experimentos. Los choques entre protones alcanzarán este año una energía total de 13 teraelectronvoltios (TeV), dos tercios más de lo que bastó para descubrir el bosón de Higgs. ¿Qué retos depara esta nueva frontera energética?

Un aspecto poco conocido de la física que explora el LHC reside en que, debido a la elevada energía de sus colisiones, resulta posible generar algunas partículas del modelo estándar en condiciones cinemáticas nunca antes vistas. En concreto, las partículas elementales más masivas pueden producirse por vez primera con una energía total muy superior a la que corresponde a su masa. Es decir, el LHC no solo las crea, sino que también puede imprimirles una gran velocidad. En términos técnicos, decimos que tales partículas se generan en el «régimen relativista» (*boosted regime*). Ello cambia por completo el modo en que se observan sus productos de desintegración, lo que exige desarrollar nuevos algoritmos para analizar el resultado de las colisiones.

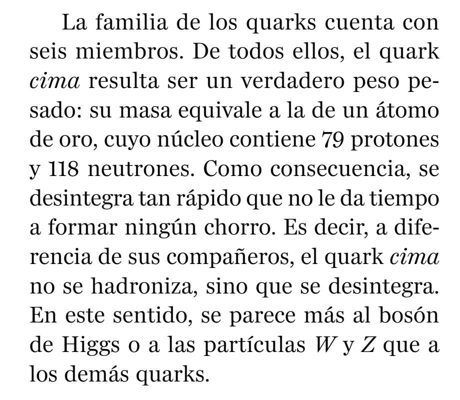
De todas las partículas elementales, la más masiva es el quark *cima* (*top*), descubierto en 1995 en el Tevatrón, cerca de Chicago. Este acelereador alcanzaba la energía necesaria para producirlo y estudiarlo en detalle, pero le sobraba muy poca para conferirle algo de velocidad. En las colisiones más violentas del LHC, sin embargo, podemos decir que el quark *cima* se comporta por primera vez como un «verdadero quark».

Durante los últimos años, un grupo de físicos teóricos y experimentales hemos desarrollado nuevas técnicas para estudiar quarks *cima* muy energéticos. Estas herramientas han permitido aumentar de manera espectacular la sensibilidad del LHC en la búsqueda de partículas hipotéticas, como las que se cree que podrían componer la materia oscura. Se prevé que, durante la segunda fase de operaciones del LHC, la producción de quarks *cima* relativistas aumente en un factor de cien, por lo que esperamos que estas técnicas desempeñen un papel clave en la búsqueda de nueva física.

Un quark diferente

Los quarks exhiben una propiedad que los distingue del resto de las partículas elementales: la libertad asintótica los condena a vivir siempre en compañía de otros quarks. Así ocurre en el protón y el neutrón, por ejemplo, cada uno de los cuales se compone de tres de estas partículas. Las posibles combinaciones de quarks dan lugar a todo un bestiario de partículas subatómicas conocidas con el nombre colectivo de hadrones. [*Véase* «Cuarenta años de libertad asintótica», por Antonio González-Arroyo; Investigación y Ciencia, junio de 2013.]

El hecho de que los quarks no puedan observarse aislados implica que, si intentamos crear uno, enseguida buscará compañía. Tanto es así que, si no la encuentra, arrancará quarks virtuales del vacío cuántico para rodearse de ellos y formar rápidamente otros hadrones. Por ello, cada vez que en un experimento generamos un quark «libre», este se convierte de inmediato en una avalancha de hadrones que viaja aproximadamente en la misma dirección que el quark inicial. Esta señal tan distintiva recibe el nombre de «chorro hadrónico» (*jet*).



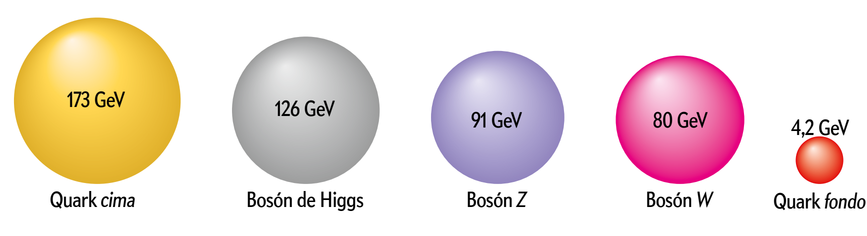
La familia de los quarks cuenta con seis miembros. De todos ellos, el quark *cima* resulta ser un verdadero peso pesado: su masa equivale a la de un átomo de oro, cuyo núcleo contiene 79 protones y 118 neutrones. Como consecuencia, se desintegra tan rápido que no le da tiempo a formar ningún chorro. Es decir, a diferencia de sus compañeros, el quark *cima* no se hadroniza, sino que se desintegra. En este sentido, se parece más al bosón de Higgs o a las partículas *W* y *Z* que a los demás quarks.

Quarks veloces y chorros masivos

Los experimentos del Tevatrón que descubrieron el quark *cima* lo identificaron a partir de sus productos de desintegración, un método que todavía sigue empleándose en el LHC. Para entender cómo funciona, imaginemos que un quark *cima* se desintegra en otros tres quarks más ligeros. Una vez producidos, cada uno de ellos generará su propio chorro hadrónico. Pero, si el quark inicial fue creado en estado de reposo —o casi—, la conservación del momento hará que los chorros del estado final salgan despedidos en direcciones distintas, por lo que incidirán en zonas del detector muy alejadas entre sí. Los algoritmos de reconstrucción tradicionales buscan señales de este tipo.

En cambio, si el quark *cima* posee una gran velocidad inicial, la topología de la desintegración cambiará por completo. Los chorros hadrónicos emergerán ahora colimados, acabarán en un área muy reducida del detector y no resultará nada sencillo identificarlos como objetos independientes.

La detección de quarks *cima* muy energéticos plantea todo tipo de dificultades, ya que los algoritmos al uso no son capaces de resolver sus productos de desintegración. En 1994, Michael Seymour, ahora en la Universidad de Manchester, propuso atacar el problema dándole la vuelta: en lugar de intentar resolver cada uno de los chorros hadrónicos, tal vez conviniese reconstruir un solo chorro que contuviese toda la energía asociada al quark *cima* inicial. En principio, tales chorros «masivos» podrían distinguirse



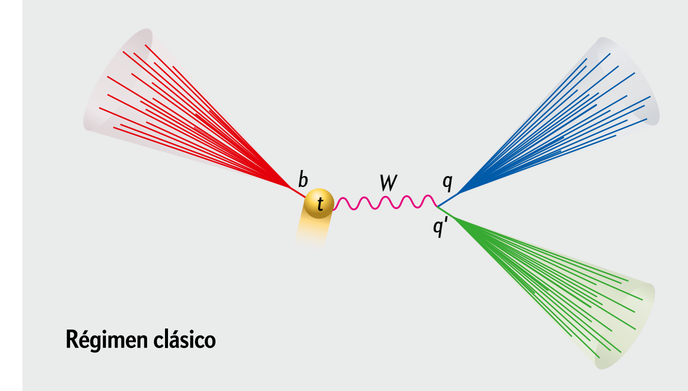
PESOS PESADOS: Solo cuatro partículas elementales poseen una masa del orden de 100 gigaelectronvoltios (GeV). La siguiente más masiva, el quark *fondo*, apenas supera los 4 GeV; aun así, su masa es unas 8000 veces mayor que la del electrón (*no mostrado*).

VELOCIDAD Y TOPOLOGÍA DE LA DESINTEGRACIÓN

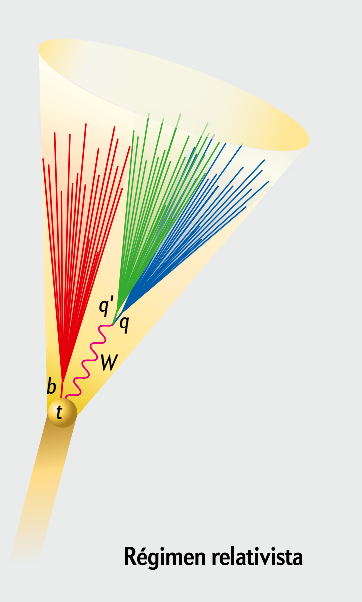
La velocidad de un quark *cima* (*top*, *t*) afecta al modo en que se observan sus productos de desintegración. Esta partícula produce con frecuencia un quark *fondo* (*bottom*, *b*) y un bosón *W;* este, a su vez, se desintegra en otra pareja de quarks (*q*, *q'*). Dado que los quarks no se observan aislados en la naturaleza, cada uno de ellos se convierte de inmediato en un chorro de hadrones (*haces de colores*).

Si un quark *cima* se crea en estado de reposo (régimen «clásico», *izquierda*), los tres chorros hadrónicos saldrán despedidos en direcciones distintas e incidirán en zonas muy alejadas del detector. En cambio, si su velocidad inicial es relativista, todos los productos de desintegración se fundirán en un único chorro (*derecha*), un proceso que los algoritmos de búsqueda tradicionales no son capaces de resolver.

El LHC es la primera máquina capaz de producir quarks *cima* relativistas; es decir, dotados de una gran velocidad inicial. Su estudio ha requerido desarrollar nuevas técnicas de análisis. En algunos casos, estas han permitido incrementar la sensibilidad del LHC en la búsqueda de nuevas partículas.



Régimen clásico



Régimen relativista

de los ordinarios a partir de un análisis adecuado de su subestructura.

El LHC es la primera máquina que ha permitido poner a prueba esta técnica de detección. En 2009, un grupo de físicos teóricos y experimentales nos embarcamos en el desarrollo de nuevas herramientas para analizar chorros masivos. Desde entonces, nuestra comunidad, que tiene como punto periódico de encuentro las conferencias BOOST, ha concebido varios métodos para reconstruir chorros hadrónicos muy energéticos y extraer información clave sobre su estructura interna.

Los primeros candidatos a quark *cima* veloces reconstruidos a partir de un único chorro fueron presentados en 2011, durante un congreso celebrado en Princeton. Con el paso del tiempo, los datos obtenidos durante la primera fase de operaciones del LHC no han hecho sino corroborar la fiabilidad de las nuevas técnicas de análisis.

Se abre la veda

La aplicación más obvia de las herramientas descritas se halla en la búsqueda de nuevas partículas masivas, como las predichas por las teorías supersimétricas y otras extensiones del modelo estándar. De hecho, es en este ámbito donde el análisis de la subestructura de chorros masivos ya ha comenzado a mostrar su valía.

Desde la puesta en marcha del LHC, los límites inferiores a la masa de un hipotético compañero pesado del bosón *Z* que se desintegre en un par de quarks *cima* han aumentado de 0,9 TeV a más de 2 TeV. Y aunque este incremento obedece principalmente al extraordinario rendimiento del acelerador, no habría sido posible sin los nuevos algoritmos para analizar chorros hadrónicos relativistas.

Por ejemplo, un análisis de la colaboración CMS publicado a finales de 2013 demostró que, en el caso de partículas muy masivas, la sensibilidad de las nuevas técnicas superaba en un factor diez a la lograda con las herramientas tradicionales. Ahora, la nueva fase de operaciones del LHC permitirá extender las búsquedas basadas en la subestructura de chorros hadrónicos más allá de los 2 TeV.

Además, las técnicas que hemos desarrollado durante estos años no se limitan al quark *cima*. Pueden también aplicarse a los demás pesos pesados del modelo estándar: el bosón de Higgs y las partículas *W* y *Z*. Varios grupos han observado bosones *W* y *Z* con la topología colimada típica de estos objetos veloces. Las mismas herramientas se han aplicado al estudio de la producción de materia oscura en el LHC y se presentan como una de las ideas más prometedoras para estudiar en detalle el bosón de Higgs.

Tal vez las mayores sorpresas provengan del análisis de las tasas de producción de pares de quarks *cima* y bosones de Higgs muy energéticos. Si bien se trata de procesos conocidos, se muestran muy sensibles a la existencia de nuevas partículas masivas. Si las medidas de precisión arrojasen alguna pequeña desviación con respecto a las predicciones del modelo estándar, ello constituiría una señal irrefutable de nueva física.

—Marcel Vos y Miguel Villaplana
Instituto de Física Corpuscular de Valencia

PARA SABER MÁS

Searches for new physics using the $t\bar{t}$ invariant mass distribution in *pp* collisions at $\sqrt{s}$ = 8 TeV. Colaboración CMS en *Physical Review Letters*, vol. 111, 211804, noviembre de 2013. Disponible en **journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.111.211804**

Boosted objects and jet substructure at the LHC. Report of BOOST2012, held at IFIC Valencia, 23rd–27th of July 2012. A. Altheimer et al. en *The European Physical Journal C*, vol. 74, 2792, marzo de 2014. Disponible en **dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-2792-8**

EN NUESTRO ARCHIVO

El descubrimiento del quark *cima*. Tony M. Liss y Paul L. Tipton en *IyC*, diciembre de 1997.

COSMOLOGÍA

El papel de los neutrinos en la evolución del universo

Varios estudios han propuesto que la existencia de neutrinos «estériles» podría explicar algunas observaciones cosmológicas. No todos los expertos están de acuerdo.

LICIA VERDE

Más de medio siglo después de su hallazgo experimental, los neutrinos siguen siendo unos grandes desconocidos. Sabemos que se crean en algunos tipos de reacciones nucleares, como las que instantes después de la gran explosión dieron lugar a los primeros núcleos atómicos del universo o las que, hoy en día, hacen brillar el Sol. Sin embargo, carecen de carga eléctrica y apenas interaccionan con la materia, por lo que resultan extremadamente difíciles de detectar. De los 80.000 cuatrillones ($8 \cdot 10^{28}$) de neutrinos que, cada segundo, atraviesan la Tierra procedentes del Sol, nuestro planeta solo intercepta uno o dos. Ello se debe a que estas partículas subatómicas solo experimentan la fuerza de la gravedad y, a escalas microscópicas, la interacción nuclear débil. Por esa razón, con frecuencia han sido apodadas «partículas fantasma».

El modelo estándar de la física de partículas, la teoría matemática que describe el mundo subatómico y sus interacciones, contempla la existencia de tres tipos de neutrinos, todos los cuales han sido detectados experimentalmente. No obstante, hay un problema que aún persiste: por un lado, la versión tradicional del modelo estándar supone que los neutrinos carecen de masa; por otro, existen indicios experimentales muy claros de que su masa, aunque pequeña, no es cero.

En particular, desde hace unos años sabemos que los neutrinos «oscilan»; es decir, que los de un tipo pueden transmutarse espontáneamente en neutrinos de otro. Y las reglas de la mecánica cuántica implican que, para que ello ocurra, los neutrinos han de tener masa. El consenso entre los físicos es que el modelo estándar debe ampliarse para dar cabida a este fenómeno. Son varios los mecanismos que se han propuesto para explicar la masa del neutrino, si bien los expertos aún ignoran cuál es el correcto [*véase* «Mensajeros fantasmales de nueva física», por Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod; Investigación y Ciencia, junio de 2013]. Uno de ellos postula la existencia de neutrinos «estériles», una nueva familia que no experimentaría la interacción nuclear débil.

El universo como detector

A pesar de su interés, el valor exacto de la masa de los neutrinos aún no ha podido determinarse experimentalmente. No se trata de una cuestión puramente académica. Además de obligar a una revisión del modelo estándar, la masa de los neutrinos afecta a otras áreas de la física. Por ejemplo, estas partículas podrían dar cuenta de una fracción, diminuta pero tal vez no despreciable, de la misteriosa materia oscura, responsable de cerca del 90 por ciento de la masa del universo.

La cosmología proporciona una sugerente alternativa para estudiar los neutrinos y medir su masa. La idea básica consiste «mirar al universo» y usar todo el espacio como un gran detector. Dado que estas partículas abundan en el cosmos, su efecto colectivo influye en varios parámetros cosmológicos, como la tasa de expansión del universo, la abundancia de cúmulos de galaxias o las cantidades estadísticas que caracterizan el fondo cósmico de microondas. De hecho, las mejores cotas superiores a la masa de los neutrinos proceden hoy de la cosmología [*véase* «Un secreto escrito en el cielo», por Sudeep Das y Tristan L. Smith; Investigación y Ciencia, junio de 2013].

También la cosmología moderna cuenta con su modelo estándar, conocido en jerga técnica como ΛCDM, o Lambda-CDM. En la versión más simple de este modelo, los neutrinos tampoco tienen masa. Su gran ventaja reside en que, a partir de unos pocos parámetros, permite describir la evolución del universo desde que tenía unos 400.000 años (la época en que se emitieron los fotones que hoy componen el fondo cósmico de microondas) hasta la actualidad, 14.000 millones de años después de la gran explosión.

El fondo cósmico de microondas puede entenderse como una instantánea del universo cuando este no era más que una sopa de núcleos atómicos (hidrógeno, principalmente), electrones, fotones y otras partículas. A partir de los datos de esta radiación primigenia, el modelo ΛCDM permite calcular los parámetros que describen el universo actual. En particular, resulta posible deducir su edad, cuán rápido se expande en estos momentos y la abundancia de grandes estructuras, como galaxias y cúmulos de galaxias.

Observaciones en desacuerdo

En los últimos dos años, las observaciones del satélite Planck, de la ESA, nos han permitido estudiar el fondo cósmico de microondas con un detalle sin precedentes. Esos datos han sacado a la luz ciertas discrepancias entre las observaciones del universo actual y las relativas al cosmos primitivo.

Por un lado, varias observaciones parecen indicar que hoy el universo contiene menos estructuras que las que predice el modelo ΛCDM si, como «condiciones iniciales», tomamos los datos del satélite Planck. Por otro, la velocidad de expansión del cosmos actual (el parámetro de Hubble) resulta ligeramente mayor que la calculada a partir del fondo de microondas.

Al menos en principio, los neutrinos podrían ayudar a resolver tales discrepancias. Si estas partículas tuviesen una masa apreciable, su tirón gravitatorio frenaría el crecimiento de estructuras cósmicas y desdibujaría el patrón de agrupamiento de las galaxias, lo que reduciría el número de cúmulos. Además, resulta posible demostrar que, si existiesen más de tres especies de neutrinos, ello contribuiría a aumentar la tasa actual de expansión cósmica.

El año pasado, Mark Wyman y otros investigadores de la Universidad de Chicago publicaron un estudio en el que argumentaban que, si el modelo ΛCDM se ampliaba para incluir neutrinos relativamente masivos y una cuarta familia



DISCREPANCIA CÓSMICA: La abundancia de cúmulos de galaxias (*en la imagen, el cúmulo de Pandora*) calculada a partir del fondo cósmico de microondas no parece coincidir con la observada en el universo actual. Para algunos físicos, ello apunta a la existencia de nuevas partículas elementales. Otros abogan por un reanálisis más cuidadoso de los datos cosmológicos.

TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE, NASA/ESA/IAC/HFF/STScI

estéril, ambas discrepancias se reducían de manera considerable. En otro trabajo, Richard Battye, de la Universidad de Manchester, y Adam Moss, de la de Nottingham, llegaron a conclusiones parecidas. Estos y otros estudios han indicado cómo reconciliar datos aparentemente incompatibles. Sin embargo, no todos los investigadores comparten sus conclusiones.

En un trabajo llevado a cabo junto con Boris Leistedt y Hiranya Peiris, del Colegio Universitario de Londres, hallamos que introducir neutrinos con una masa relativamente elevada producía una concordancia solo aparente. La estructura a gran escala del universo ha sido estudiada mediante observaciones y técnicas de análisis muy dispares, por lo que existen varias series de datos al respecto. Y los modelos con neutrinos tan masivos, aunque ajustan estadísticamente algunas combinaciones de datos, no eliminan todas las discrepancias existentes entre ellos.

Al efectuar un análisis con distintas combinaciones de datos y examinar las diferentes posibilidades, puede verse que, en realidad, casi todos los datos favorecen el modelo ΛCDM frente a cualquiera de sus deformaciones. Solo la abundancia de cúmulos de galaxias sigue fuera de línea. Sin embargo, esta clase de observaciones son las que más dificultades entrañan para los cosmólogos. Si por un momento las dejamos de lado, las anomalías desaparecen.

En nuestra opinión, la tensión entre los diferentes conjuntos datos apunta a la existencia de errores sistemáticos en las observaciones cosmológicas más delicadas. Y, en cualquier caso, si las investigaciones futuras descartasen efectos sistemáticos, habría que considerar hipótesis alternativas a la adición de neutrinos muy masivos.

En definitiva, los experimentos de física de partículas que miden las oscilaciones de neutrinos permiten derivar un límite inferior a su masa. La cosmología nos brinda una cota superior. Pero no hay mucho margen. Si logramos mantener los efectos sistemáticos bajo control, las investigaciones cosmológicas futuras podrán determinar la masa de estas partículas. Ese es el reto para los próximos años, pero también una apasionante perspectiva.

—Licia Verde
Instituto de Ciencias del Cosmos
Universidad de Barcelona e Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña
y Universidad de Oslo

PARA SABER MÁS

Neutrinos help reconcile Planck measurements with the local universe. Mark Wyman et al. en *Physical Review Letters*, vol. 112, 051302, 6 de febrero de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1307.7715**

Evidence for massive neutrinos from cosmic microwave background and lensing observations. Richard Battye y Adam Moss en *Physical Review Letters*, vol. 112, 051303, 6 de febrero de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1308.5870**

No new cosmological concordance with massive sterile neutrinos. Boris Leistedt, Hiranya V. Peiris y Licia Verde en *Physical Review Letters*, vol. 113, 041301, 21 julio de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1404.5950**

FÍSICA

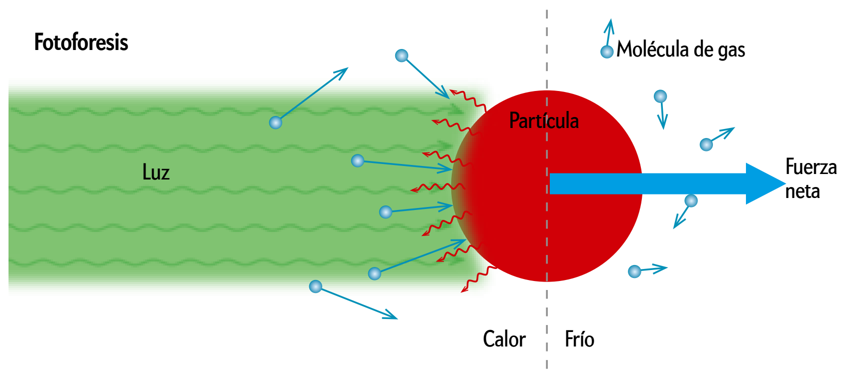
Una cámara acorazada óptica

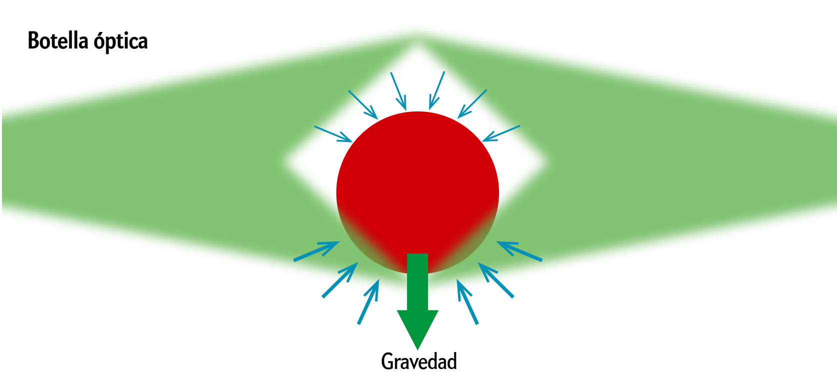
Un nuevo dispositivo basado en la refracción cónica permite atrapar macropartículas mediante un haz de luz

ÁLEX TURPIN Y JORDI MOMPART

Desde finales de los años setenta del siglo pasado, se han ido desarrollando técnicas ópticas de captura y transporte tanto de átomos individuales como de partículas microscópicas. Pensemos en la «pinza óptica», esto es, el efecto que se produce cuando un haz de luz muy focalizado atraviesa una partícula y esta queda atrapada en el punto focal. Esta técnica se encuentra hoy en día en un estado muy avanzado de desarrollo, pero tiene el inconveniente de que solo permite capturar partículas extremadamente pequeñas, del tamaño de un micrómetro o menos (para atrapar partículas de mayor tamaño se necesitarían intensidades tan elevadas que podrían llegar a quemarlas).

¿Cómo podríamos manipular cuerpos más voluminosos? A lo largo del último decenio se ha llevado a cabo un gran avance en el estudio de una alternativa para la manipulación óptica. Nos referimos a la fotoforesis. Conocida desde el siglo XIX, esta puede entenderse de una manera sencilla: cuando un haz de luz alcanza una partícula, esta absorbe parte de la energía lumínica, se calienta y empieza a radiar calor hacia el entorno; cuando las moléculas del gas o líquido del medio reciben este calor, incrementan su energía cinética (se agitan más fervientemente) y empiezan a intercambiar momento lineal con la partícula en forma de pequeños golpes, de tal manera que esta es empujada en el sentido que la aleja de la fuente de luz.





TRACTORES Y BOTELLAS: Cuando un haz de luz (*arriba, verde*) ilumina una partícula, esta absorbe parte de la energía lumínica y la emite en forma de calor (*radiación roja*). Ello aumenta la energía cinética de las moléculas del medio (*bolas azules*), por lo que chocan con mayor fuerza contra la partícula. Dado que este intercambio de momento lineal es mayor en el lado iluminado, la partícula acaba alejándose de la fuente de luz; esta migración por efecto de la luz se denomina fotoforesis. Si la partícula se ilumina de manera simétrica mediante un haz que genera un hueco, queda atrapada en una suerte de botella óptica (*abajo*).

Botellas ópticas

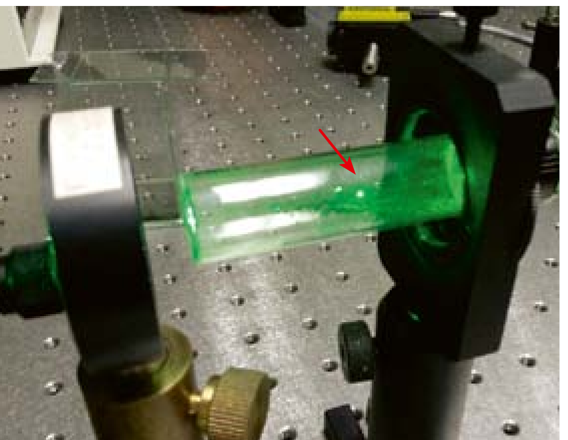
Imaginemos que nuestra partícula fuera iluminada de manera simétrica en todas las direcciones. En este caso, el momento lineal comunicado a la misma por parte del medio sería también simétrico en todas las direcciones y esta quedaría confinada en una región del espacio. No obstante, para que esto suceda, el haz de luz debería abrirse y cerrarse sobre sí mismo, generando un hueco. Los haces que presentan este curioso comportamiento se denominan botellas ópticas.

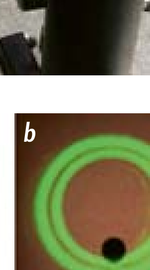
Pero generar una botella óptica no es tan sencillo. En primer lugar, se requiere un ajuste extremadamente preciso de los haces. Suelen utilizarse dos láseres contrapropagantes, es decir, que viajan en la misma dirección pero en sentidos opuestos, de tal manera que su interferencia resulta destructiva en un único punto del espacio.

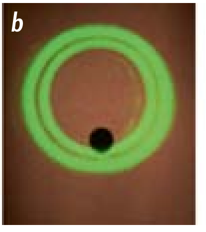
En segundo lugar, ¿cómo pueden las partículas entrar en la botella óptica si son repelidas por la luz? Lo que se hace es reducir la intensidad de la luz y dejar caer las partículas desde arriba para que pasen a través de la botella óptica. La mayoría caen a tal velocidad que la atraviesan. Sin embargo, de manera eventual alguna es frenada lo suficiente como para quedar atrapada. Llegados a ese punto, se incrementa la intensidad de la luz y la partícula queda confinada en la botella óptica. Como el lector podrá intuir, este método resulta muy poco eficiente, puesto que la tasa de éxito es muy reducida (se requieren numerosos intentos para cada captura).

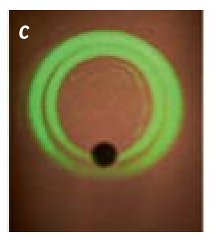
En el grupo de óptica de la Universidad Autónoma de Barcelona hemos desarrollado una técnica que permite generar botellas ópticas macroscópicas de una manera muy sencilla. Se basa en la refracción cónica, un efecto conocido desde hace prácticamente doscientos años pero que recientemente ha despertado gran interés.

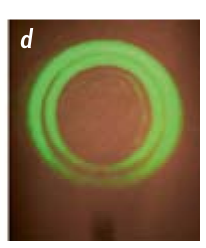
La refracción cónica se da en cristales biaxiales, similares al mineral de aragonita. Estos deben su nombre al hecho de que, cuando son atravesados por un haz











EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS atrapadas en la botella óptica creada por refracción cónica es tan grande que pueden observarse a simple vista (*flecha roja*). La secuencia de imágenes muestra la captura de la partícula en la trampa, abierta por arriba (*a*); el cierre de la trampa, que aguanta la partícula contra la gravedad gracias a la fuerza de fotoforesis (*b*); la apertura de un agujero en la parte inferior (*c*) y la correspondiente liberación de la partícula (*d*).

CORTESÍA DE LOS AUTORES

de luz, lo dividen en dos haces a la salida del cristal. Este fenómeno, conocido como birrefringencia, ya fue observado por Rasmus Bartholin en el siglo XVII.

Pero lo que caracteriza realmente a los cristales biaxiales es que hay una sola dirección (el eje óptico) por la cual el haz de luz a la salida del cristal queda transformado en un cilindro hueco cuya sección transversal forma un anillo lumínico. Si, además, el haz incidente está focalizado por una lente, este queda transformado en una botella óptica en forma de doble cono que abre y cierra el haz haciendo al anillo de luz visible solo en el plano intermedio entre los vértices de los dos conos.

¿Qué diferencia a nuestra botella óptica del resto? Por un lado, se necesita solo un haz de entrada para generarla. Por otro —más importante todavía—, la polarización de la luz en cada punto del anillo es única y diferente de la del resto de puntos, por lo que el «recipiente» puede abrirse y cerrarse a voluntad mediante un polarizador como los que se usan en las cámaras fotográficas.

Una ratonera para partículas

De manera accidental, en junio de 2013 asistimos en la Universidad Politécnica de Cataluña a una charla de Wieslaw Krolikowski, investigador de la Universidad Nacional Australiana en Canberra y director del grupo líder del campo de la manipulación de partículas mediante fotoforesis. Cuando vimos sus dificultades para cargar partículas en botellas ópticas nos dimos cuenta de que teníamos la clave para solucionarlo. Nos pusimos en contacto con él, y al mes siguiente marchamos rumbo a Australia para comprobar nuestro método de captura óptica.

La propuesta era simple: aprovechar la refracción cónica para generar una botella óptica y abrirla por la parte superior, lo cual hace que la carga de partículas en la trampa óptica se convierta en una tarea realmente sencilla. Una vez una partícula ha entrado en la botella, cambiamos la polarización mediante una simple rotación de una lámina retardadora (un dispositivo que permite transformar un haz de luz con polarización lineal a polarización elíptica o incluso circular) y nuestra botella queda cerrada, como si de una cámara acorazada para partículas se tratara. Finalmente, cuando queremos liberar la partícula, basta con rotar nuevamente la lámina retardadora en la dirección contraria para abrir la botella óptica por la parte inferior y dejar que la partícula caiga. Es increíble ver lo sencilla que resulta esta trampa para partículas comparada con otras técnicas de captura óptica, puesto que necesitamos solo un cristal y un láser. Tres meses después de la visita a Canberra, nuestro trabajo ya estaba publicado en la revista *Optics Express*.

Aunque hemos demostrado la captura de esferas huecas de vidrio de unos cien micrómetros —es decir, partículas observables a simple vista y más gruesas que un cabello—, las dimensiones de nuestra botella óptica hacen que en principio puedan ser atrapadas partículas cercanas al medio milímetro de diámetro. Estas permanecen atrapadas todo el tiempo necesario siempre y cuando la intensidad del láser se mantenga estable, cosa que es habitual. Incluso hemos comprobado que, si se hace lo bastante rápido, puede pasarse la mano por delante del láser y la trampa resiste. Mediante un fenómeno que estaba prácticamente olvidado hace apenas diez años, hemos podido dar solución a un problema de ciencia actual.

¿Para cuándo el rayo tractor de *Star Trek*?

Actualmente estamos trabajando en ir un paso más allá y desplazar de manera dinámica las partículas atrapadas. Para ello, debemos ser capaces de cambiar a voluntad la posición de nuestra botella óptica.

Semejante técnica tendría un gran impacto en biomedicina, puesto que permitiría manipular a distancia virus altamente infecciosos; en la industria farmacéutica y química, donde se podrían seleccionar de manera individual compuestos y filtrarlos por tamaño, y en la construcción a distancia de estructuras micrométricas, por ejemplo en el espacio. Parece que cada día nos hallamos más cerca de la tecnología que equipaba la *Enterprise*.

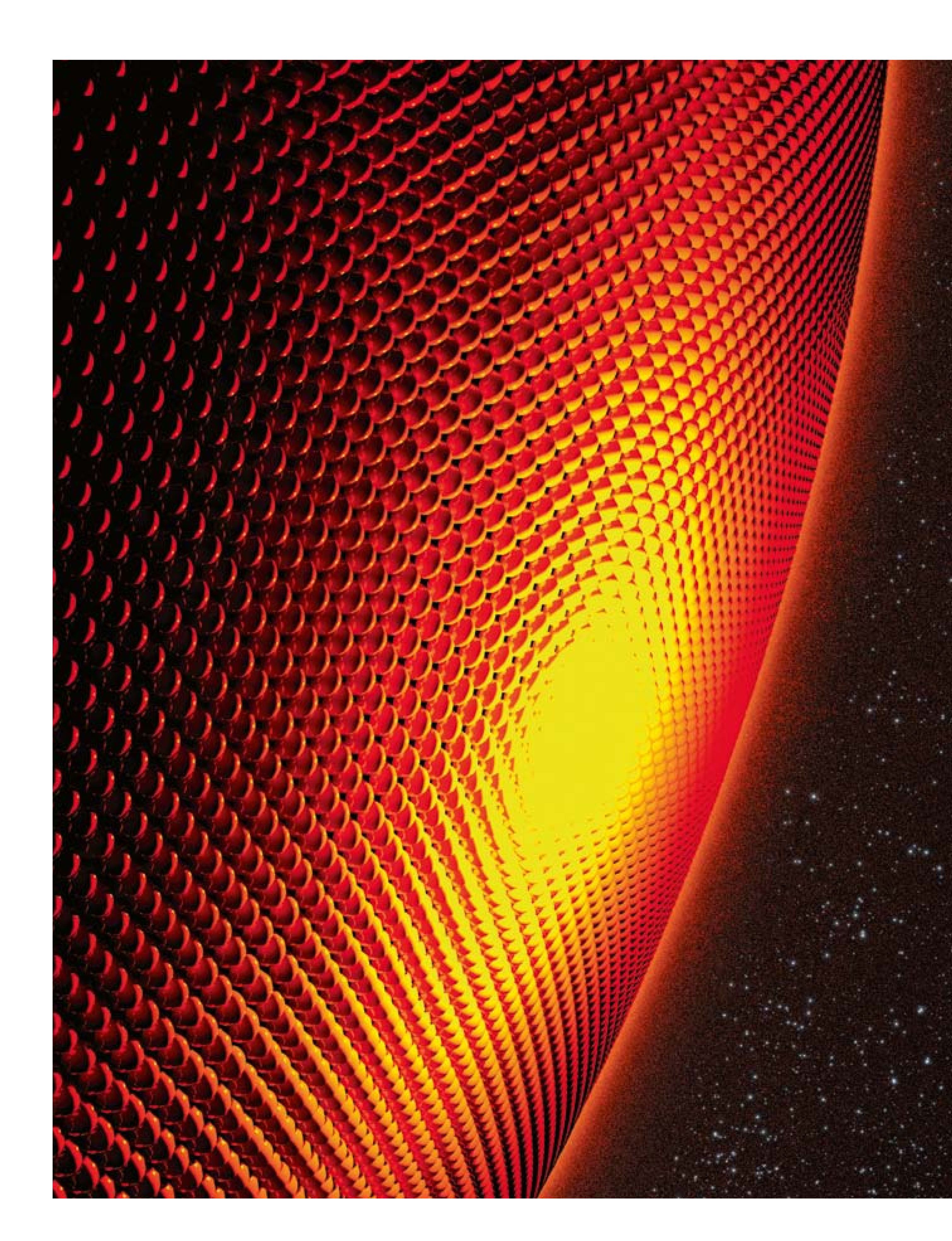
—Álex Turpin y Jordi Mompart
Grupo de óptica
Departamento de física
Universidad Autónoma de Barcelona

PARA SABER MÁS

Photophoretic manipulation of absorbing aerosol particles with vortex beams: Theory versus experiment. Anton S. Desyatnikov et al. en *Optics Express*, vol. 17, pág. 8201, 30 de abril de 2009.
Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: The optical bottle beam. Jochen Arlt y Miles. J. Padgett en *Optics Letters*, vol. 25, pág. 191, 15 de febrero de 2000.
Optical vault: A reconfigurable bottle beam based on conical refraction of light. Alex Turpin et al. en *Optics Express*, vol. 21, pág 26335, 25 de octubre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nanoantenas ópticas. Romain Quidant en *IyC*, agosto de 2009.
Rayos láser tractores. Juan José Sáenz en *IyC*, abril de 2013.
Pinzas de partículas. Rachel Nuwer en *IyC*, junio de 2014.



AGUJEROS NEGROS Y MUROS DE FUEGO

¿Incineran los agujeros negros a quien intenta penetrar en ellos? Una nueva propuesta obliga a repensar la relatividad general y la mecánica cuántica asociada a estos objetos

Joseph Polchinski

Caer en un agujero negro nunca fue divertido. Tan pronto como los físicos dedujeron la existencia de estos objetos, se percataron de que acercarse demasiado a uno de ellos supondría una muerte segura. Sin embargo, hasta hace muy poco creíamos que un astronauta no sentiría nada especial al cruzar el horizonte de sucesos, la frontera más allá de la cual resulta imposible regresar. Según la teoría de la relatividad general de Einstein, el horizonte no se encuentra marcado por ninguna señal particular. Las malas noticias solo llegan después: quienquiera que lo atraviese únicamente podrá caer, caer y caer hacia una profunda oscuridad.

Hace tres años, en colaboración con Donald Marolf y los entonces estudiantes de posgrado Ahmed Almheiri y James Sully, por aquella época todos en la Universidad de California en Santa Bárbara (hoy a los cuatro se nos conoce por las siglas AMPS), nos propusimos reconsiderar esa imagen a la luz de algunas ideas recientes sobre las propiedades cuánticas de los agujeros negros. Al hacerlo, llegamos a la conclusión de que el astronauta viviría una experiencia muy distinta de la predicha por Einstein. En lugar de deslizarse suavemente hacia el interior, al llegar al horizonte se toparía con un «muro de fuego» (*firewall*): partículas de alta energía que lo aniquilarían al instante. Ese muro podría incluso señalar el fin del espacio.

Llegamos a ese resultado al emplear ciertas ideas procedentes de la teoría de cuerdas para analizar con detalle una paradoja planteada hace casi cuarenta años por Stephen Hawking. En los años setenta, el físico de Cambridge identificó un profundo conflicto entre las predicciones de la relatividad general y las de la mecánica cuántica en presencia de estos objetos. Según él, o bien la teoría cuántica era errónea, o bien lo era la descripción einsteiniana del espaciotiempo. La batalla sobre qué punto de vista resulta correcto se ha perpetuado desde entonces.

Tal y como ocurrió con la idea de Hawking, nuestros muros de fuego han desatado una tormenta de incredulidad sin que nadie haya ofrecido una alternativa satisfactoria. Si aceptamos la mecánica cuántica, la consecuencia son los muros de fuego. Sin embargo, su existencia plantea nuevos rompecabezas teóricos. Parece que los físicos hemos de abandonar alguna de nuestras teorías más queridas, pero no podemos ponernos de acuerdo en cuál. Con todo, esperamos que de esta confusión emerja una imagen más completa de la mecánica cuántica y de la relatividad general y, en última instancia, una vía para resolver las aparentes contradicciones entre ellas.

LA SINGULARIDAD

La relatividad general, la teoría que dio a luz el concepto de agujero negro, deriva su imagen de estos objetos y sus horizontes de sucesos a partir de la manera en que concibe la acción de la gravedad sobre el espacio y el tiempo. Según ella, al juntar una cantidad suficiente de materia, la atracción gravitatoria hará que comience a colapsar sobre sí misma. Ese proceso continuará hasta que toda la masa haya quedado comprimida en un punto. Dicho punto, donde la densidad y la curvatura del espaciotiempo se tornan infinitas, recibe el nombre de singularidad. El objeto resultante es un agujero negro.

Un viajero que cruce el horizonte de sucesos de un agujero negro sucumbirá al tirón gravitatorio y será arrastrado sin remedio hacia la singularidad. Ni siquiera la luz puede escapar de la región interior. Pero, aunque la singularidad sea un lugar horrible, el horizonte no debería tener nada de particular. Según el principio de equivalencia de la relatividad general, un astronauta que lo traspase experimentará las mismas leyes físicas que cualquier otro observador. A los teóricos les gusta decir que todo el sistema solar podría estar cruzando ahora mismo un horizonte de sucesos sin que notásemos nada fuera de lo normal.

LA RADIACIÓN DE LOS AGUJEROS NEGROS

El desafío de Hawking comenzó en 1974, al considerar los efectos de la mecánica cuántica en presencia de un agujero negro. Según la teoría cuántica, el vacío se encuentra repleto de pares de partículas y antipartículas que constantemente aparecen y se desvanecen. Hawking demostró que, si esas fluctuaciones ocurren justo en el exterior de un horizonte de sucesos, la pareja puede separarse. Un miembro caería dentro y el otro escaparía. El resultado final es que un agujero negro radia partículas, las cuales van drenando poco a poco su masa. En principio, toda la masa del agujero negro puede acabar filtrándose hacia el exterior mediante este proceso, conocido como «evaporación de Hawking».

Para los agujeros negros del mundo real, la evaporación es irrelevante. Dado que constantemente engullen polvo y gas, ganan mucha más masa que la que pierden por radiación de Hawking. Sin embargo, por un interés puramente teórico, podemos preguntarnos qué sucedería si un agujero negro se encontrase completamente aislado y dispusiéramos de tiempo suficiente para observar su evaporación hasta el final. Merced a este experimento mental, Hawking dedujo dos aparentes contradicciones entre la relatividad general y la mecánica cuántica.



Joseph Polchinski es catedrático de física de la Universidad de California en Santa Bárbara y miembro del Instituto Kavli de Física Teórica, de la misma universidad. Sus investigaciones se centran en la naturaleza de la dualidad y en la gravedad cuántica.

El problema de la entropía. Al calcular qué le ocurría a un agujero negro aislado, Hawking obtuvo que el espectro de la radiación emitida coincidía con el de un cuerpo caliente. Ese resultado implicaba que los agujeros negros debían tener una temperatura. La temperatura de un objeto ordinario se debe al movimiento de sus átomos. Por tanto, la naturaleza térmica de la radiación de Hawking sugiere que un agujero negro debería estar formado por algún tipo de componentes microscópicos básicos, o «bits». Jacob D. Bekenstein, ahora en la Universidad Hebrea de Jerusalén, había llegado a la misma conclusión dos años antes al considerar experimentos mentales consistentes en lanzar objetos a un agujero negro. Los trabajos de Bekenstein y Hawking proporcionaban una fórmula para el número de bits, una medida conocida como entropía del agujero negro. En general, la entropía constituye un indicador de desorden: aumenta a medida que lo hace el número de estados microscópicos en los que puede encontrarse un sistema. Cuantos más componentes básicos tenga un agujero negro, más disposiciones podrán adoptar estos y mayor será su entropía.

En cambio, la relatividad general nos dice que la geometría de un agujero negro es suave, y que todos los agujeros negros con la misma masa, momento angular y carga eléctrica deberían ser exactamente iguales. El fallecido John Wheeler, de la Universidad de Princeton, lo expresó diciendo que «los agujeros negros no tienen pelo». He aquí la primera contradicción: mientras que la relatividad general afirma que los agujeros carecen de subestructura, la mecánica cuántica nos indica que poseen una gran cantidad de entropía, lo que implica una estructura microscópica, o «pelo».

La paradoja de la información. La evaporación de Hawking también pone en aprietos a la teoría cuántica. Según su cálculo, el espectro de radiación de un agujero negro es universal: las partículas emitidas no dependen en absoluto de qué objetos hayan caído antes en él. Si lanzamos una nota con un mensaje, no habría manera de reconstruir el texto a partir de las partículas radiadas. Una vez que la nota atraviese el horizonte, no podrá afectar a nada que más tarde emerja del agujero negro, ya que ninguna información puede escapar de su interior.

En mecánica cuántica, todo sistema queda descrito por una función de onda, la cual determina la probabilidad de encontrar

EN SÍNTESIS

En los años setenta, Stephen Hawking descubrió que los agujeros negros radian partículas, por lo que acabarían «evaporándose». Ello implicaba que destruirían la información, algo prohibido por la mecánica cuántica.

Algunas ideas procedentes de la teoría de cuerdas parecían apuntar a una resolución del problema. Según ellas, el proceso de evaporación de un agujero negro respetaría las leyes cuánticas y no eliminaría la información.

El autor y sus colaboradores han argumentado que, para preservar la información, un agujero negro debe estar rodeado por un «muro» de partículas de alta energía. La idea socava una de las predicciones básicas de la relatividad general.

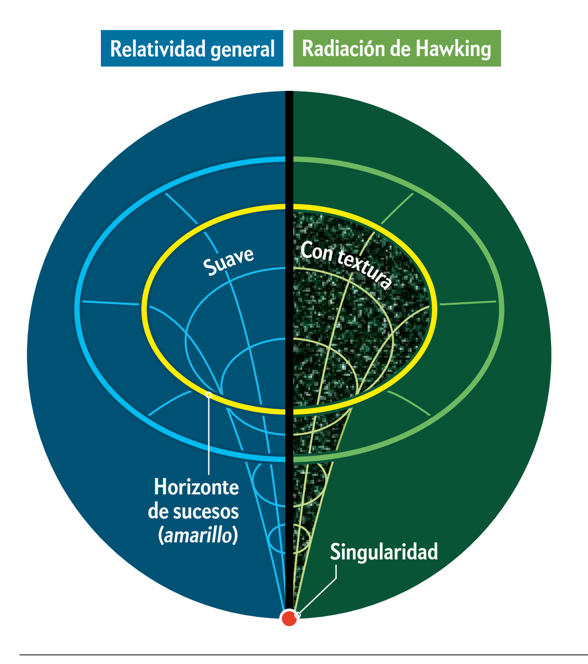
PÁGINAS ANTERIORES: KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

Agujeros negros e información

En 1974, Stephen Hawking demostró que los agujeros negros emiten una pequeña cantidad de radiación. Según la mecánica cuántica, el vacío se encuentra lleno de pares de partículas y antipartículas que constantemente surgen y se desvanecen. Hawking observó que, si uno de esos pares aparece cerca del horizonte de sucesos de un agujero negro, una partícula puede caer dentro y la otra escapar. Este fenómeno, llamado radiación de Hawking, plantea varios rompecabezas.

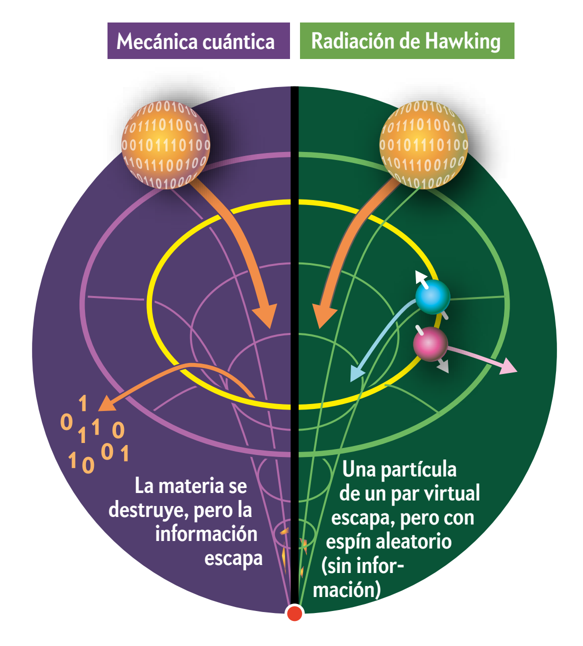
El problema de la entropía

El espectro de la radiación de Hawking sugiere que los agujeros negros tienen asociada una temperatura. En un objeto común, la temperatura se encuentra relacionada con el movimiento de sus átomos. Por tanto, un agujero negro debería tener algún tipo de subestructura: piezas elementales que se puedan reordenar. A su vez, la posibilidad de disponer esos componentes de una forma u otra dota a los agujeros de una medida de desorden, o entropía. Según la relatividad general, sin embargo, los agujeros negros carecen de subestructura, por lo que tampoco podrían tener entropía.



La paradoja de la información

La mecánica cuántica prohíbe el borrado de información. Incluso al quemar una carta, la información del mensaje quedará codificada en los átomos de la ceniza, el humo y la luz. Sin embargo, el carácter térmico de la radiación de Hawking implica que los agujeros negros destruyen de veras la información, ya que las propiedades de las partículas emitidas no dependen en absoluto de los átomos que hayan caído antes en el agujero negro. Hawking sugirió que la mecánica cuántica debía modificarse para dar cabida a esta pérdida de información.

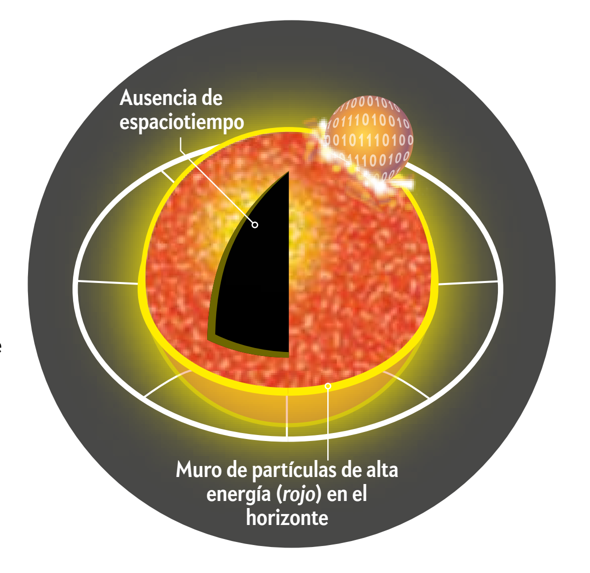


Algunas ideas previas (*no mostradas*)...

Para resolver tales rompecabezas, se han propuesto diversas formas de combinar la relatividad general con la mecánica cuántica. Un avance importante llegó con la teoría de cuerdas, la cual postula que las partículas elementales corresponden a diminutas «cuerdas» en vibración. Esta teoría permite explicar la entropía de algunos agujeros negros y parece indicar una forma de preservar la información.

... condujeron a los muros de fuego

Según el autor y sus colaboradores, las leyes cuánticas implican que los agujeros negros han de estar rodeados por «muros de fuego»: murallas de partículas de alta energía que incinerarían al instante cualquier objeto que intentase adentrarse más allá del horizonte. Dicha conclusión contradice una de las predicciones básicas de la relatividad general y plantea algunas posibilidades extremas, como que los muros de fuego marquen el final del espacio y el tiempo.



JEN CHRISTIANSEN

el sistema en un estado u otro. En el experimento mental de Hawking, la pérdida de información significa que no hay forma de predecir la función de onda de la radiación a partir de las propiedades de lo que cayó en el agujero negro. La pérdida de información está prohibida en mecánica cuántica, por lo que Hawking concluyó que la teoría debía modificarse para dar cabida a la pérdida de información en los agujeros negros.

El lector debe estar diciéndose: «Por supuesto que los agujeros negros destruyen la información. ¡Destruyen todo lo que cae en ellos!». Pensemos qué sucedería si simplemente quemásemos la nota. Sin duda, el mensaje acabaría tan desmenuzado que, en la práctica, resultaría imposible reconstruirlo a partir del humo. Pero sabemos que, durante la combustión, los átomos obedecen las leyes de la mecánica cuántica, por lo que la función de onda del humo ha de depender del mensaje original. Así que, al menos en teoría, podríamos reconstruir el texto a partir de dicha función de onda.

Con esa analogía en mano, muchos teóricos concluyeron que Hawking estaba equivocado. Que había confundido la simple mezcla de información con su verdadera pérdida. Además, argumentaron algunos, si la información realmente pudiese desaparecer, el fenómeno no se restringiría a una situación tan exótica como la evaporación de un agujero negro. Se manifestaría en todo momento y lugar, ya que en mecánica cuántica todo lo que puede ocurrir acaba ocurriendo. Si Hawking se hallaba en lo cierto, veríamos signos de ello en la física cotidiana, lo que probablemente incluiría violaciones muy graves de la ley de la conservación de la energía.

Sin embargo, el argumento de Hawking resiste las objeciones más simples. Y, a diferencia de un papel ardiendo, los agujeros negros tienen horizontes que impiden que la información escape. Llegamos así a una paradoja muy evidente: o alteramos la mecánica cuántica para permitir la pérdida de información, o modificamos la relatividad general para que la información pueda escapar de un agujero negro.

Hay una tercera posibilidad: que los agujeros negros no se evaporen por completo y que dejen algún residuo microscópico que contenga toda la información de la materia que lo creó. Pero esta «solución» adolece de sus propios problemas. Entre otros, si un objeto tan diminuto pudiese almacenar tanta información, violaría la noción de entropía de Bekenstein y Hawking.

AGUJEROS NEGROS Y BRANAS

La teoría de cuerdas intenta solucionar los problemas que surgen al conjuntar la mecánica cuántica y la relatividad general. Dicha teoría postula que las partículas puntuales son, en realidad, diminutos bucles o hebras. Gracias a ello, algunas de las dificultades matemáticas que aparecen al combinar la gravedad y la teoría cuántica desaparecen. Sin embargo, reemplazar las partículas por cuerdas no soluciona de inmediato el problema de los agujeros negros.

Un avance al respecto llegó en 1995, cuando estaba considerando otra clase de experimento mental sobre cuerdas en espacios diminutos. A partir de una serie de resultados previos tanto míos como de otros investigadores, demostré que la teoría de cuerdas tal y como la entendíamos por aquella época estaba incompleta: era necesario añadir cierta clase de objetos multidimensionales llamados D-branas. En un agujero negro, las D-branas estarían empaquetadas en dimensiones ocultas y demasiado pequeñas para detectarlas.

Un año después, Andrew Strominger y Cumrun Vafa, hoy en Harvard, demostraron que esa descripción en términos de cuerdas y D-branas proporcionaba el número de bits justos para dar cuenta de la entropía de los agujeros negros, al menos en algunos casos muy simétricos. El problema de la entropía quedaba así parcialmente resuelto.

¿Y la pérdida de información? En 1997, Juan Maldacena, hoy en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, dio con una forma de sortear la paradoja gracias a lo que hoy se conoce como «dualidad de Maldacena». En general, llamamos «dualidad» a una equivalencia entre dos fenómenos que, a primera vista, no parecen guardar nada en común. Maldacena propuso que las matemáticas asociadas a cierta teoría cuántica de la gravedad basada en la teoría de cuerdas eran, bajo ciertas circunstancias, equivalentes a las matemáticas de una teoría cuántica de partículas ordinarias. En concreto, la física cuántica de un agujero negro correspondería a la de un gas de partículas nucleares calientes. La dualidad de Maldacena implicaba, además, que el espaciotiempo sería algo muy distinto de lo que percibimos; algo así como un holograma tridimensional proyectado desde la superficie bidimensional de una esfera.

La dualidad de Maldacena ofrece una manera de describir la mecánica cuántica de los agujeros negros. Si su teoría es correcta, la gravedad admite una formulación alternativa basada en las leyes cuánticas habituales, en las que la información nunca desaparece. Un razonamiento más indirecto permite concluir que los agujeros negros no pueden dejar ningún residuo al evaporarse. Por tanto, si la información se conserva, ha de estar codificada en la radiación de Hawking.

Puede defenderse que la dualidad de Maldacena es lo más cerca que hemos estado nunca de unificar la relatividad general y la mecánica cuántica. Maldacena la dedujo mientras investigaba el problema de la entropía y la paradoja de la información en los agujeros negros. Y aunque aún no ha sido demostrada formalmente, hay una enorme cantidad de indicios a su favor. Tantos que, en 2004, Hawking se retractó, reconoció que los agujeros no destruían la información y saldó la apuesta que mantenía con John Preskill, físico del Caltech, en la Conferencia Internacional de Relatividad General y Gravitación en Dublín.

La mayoría de los físicos pensaba que ningún observador detectaría jamás una violación de la relatividad general u otra ley física cerca del horizonte de sucesos de un agujero negro que funcionase como postulaba Maldacena. Sin embargo, su dualidad no acababa de explicar claramente cómo se filtraba la información al exterior.

Hace unos veinte años, Leonard Susskind, de Stanford, y Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, propusieron una solución al problema de la información. Esta se basaba en lo que llamaron «principio de complementariedad», una especie de principio de relatividad: en esencia, un observador que cayese en un agujero negro encontraría la información dentro, mientras que uno que permaneciese en el exterior la vería salir. La idea no implica ninguna contradicción, ya que uno y otro no pueden comunicarse.

MUROS DE FUEGO

La dualidad de Maldacena y el principio de complementariedad parecían haber eliminado todas las paradojas; sin embargo, faltaban por concretar los detalles. En 2012, nuestra colaboración AMPS intentó construir un modelo que mostrase cómo funcionaba todo. Para ello nos basamos en algunas ideas de Samir Mathur, de la Universidad estatal de Ohio, y Steven Giddings, de la Universidad de California en Santa Bárbara (y extendimos, sin saberlo, un razonamiento anterior debido a Samuel Brauns-

¿Fuego en el horizonte?

Pese a las serias discordancias entre la física cuántica y la gravedad, parece prematuro abandonar la teoría de Einstein de los agujeros negros

ROBERTO EMPARAN

En 1976, Stephen Hawking señaló una contradicción básica entre la teoría de Einstein de los agujeros negros y la física cuántica. Casi cuarenta años después, esta «paradoja de la información» sigue resistiendo tenazmente todos nuestros intentos por resolverla.

Dicha paradoja puede verse como un problema de irreversibilidad fundamental. Uno de los principios básicos de la física cuántica dicta que todo proceso ha de ser siempre reversible. Por ello, si nuestra tableta de última generación cae en un horno crematorio, no debemos desesperar: bastará con reunir las cenizas y la radiación generadas durante la quema y procesarlas en un superordenador cuántico. Al menos en principio, ello nos permitirá reconstruir todas las fotos y documentos que guardábamos en la tableta.

Por supuesto, lo anterior no es más que un experimento mental; hoy por hoy, seguimos muy lejos de poder llevar a cabo algo así. Sin embargo, a los físicos nos gusta considerar esta clase de procesos imaginarios para investigar la consistencia interna de nuestras teorías. En este caso, lo importante es que, mientras la tableta se quema, todas las partes del sistema pueden intercambiar información entre sí. De este modo, la información se conserva globalmente a lo largo de la combustión, por más que se redistribuya de una forma muy complicada.

Eso no ocurre si la tableta cae en un agujero negro. Una vez que haya atravesado el horizonte de sucesos, resultará imposible transmitir su información al exterior. Por ello, si el agujero negro se «evapora» emitiendo radiación térmica —como descubrió Hawking en 1974— y acaba desapareciendo, la información quedará aniquilada. Es decir, nos encontraríamos ante un proceso verdaderamente irreversible.

Modificar la física cuántica para hacer sitio a esa irreversibilidad sin introducir efectos colaterales indeseados resulta notablemente difícil. Tanto es así que muchos físicos pensaron que, de alguna manera, la información seguiría siendo accesible desde el exterior del agujero negro.

En 2012, Joseph Polchinski y sus colaboradores, conocidos como AMPS por sus iniciales, argumentaron que las consecuencias de esa opción resultaban mucho más conflictivas de lo que nunca habíamos imaginado. Si nos empeñamos en que la información se mantenga accesible desde fuera —por ejemplo, en forma de fotones que almacenen cada uno un bit de información—, debe existir una fuerza enorme cerca del horizonte que impida a esos fotones caer hacia el interior. Esa barrera, que AMPS denominaron «muro de fuego», sería percibida por cualquiera que intentase atravesar el horizonte de sucesos. Las consecuencias son tremendas: semejante «muro» difiere por completo de lo que predice la teoría de Einstein, según la cual en el horizonte no debería ocurrir nada especial.

Aun reconociendo la dificultad del reto lanzado por AMPS, muchos, quizá la mayoría, de los físicos han rechazado seguirles hasta su última conclusión. Estamos habituados a que los efectos cuánticos resulten inapreciables en los objetos macroscópicos. Sin embargo, los muros de fuego implican que la mecánica cuántica altera por completo las propiedades de los agujeros negros, incluso si son tan grandes como el que ocupa el centro de la Vía Láctea, con un tamaño de millones de kilómetros, o Gargantúa, el agujero negro de *Interstellar*. Si bien AMPS sugieren que tal vez los muros de fuego solo aparezcan en agujeros negros muy antiguos (con una edad mayor que la del universo actual), no estamos preparados para aceptar un fracaso tan drástico de la teoría de Einstein sin haber descartado antes todas las opciones.

Sortear el muro

Una de las alternativas más interesantes ha sido la propuesta por Kyriakos Papadodimas, del CERN y la Universidad de Groninga, y Suvrat Raju, del Centro Internacional para las Ciencias Teóricas de Bangalore. En ella, el interior del agujero negro no tiene una existencia independiente del exterior. El principal logro de estos investigadores ha sido demostrar cómo el interior puede ser codificado empleando únicamente magnitudes accesibles a los observadores externos. En realidad, toda la información se encuentra fuera del horizonte. Por tanto, para un observador externo resulta posible —aunque extremadamente difícil— describir lo que sucede en el interior. Seguimos disponiendo de la información almacenada en nuestra tableta; es decir, su caída en el agujero negro constituye un proceso reversible, tal y como exigen las leyes cuánticas. Pero, a menos que llevemos a cabo observaciones muy precisas, describiremos dicho proceso de manera casi idéntica a como lo hace la teoría de Einstein; en particular, sin encontrar muros de fuego y, aparentemente, perdiendo la información. Ello permite armonizar ambas teorías preservando lo esencial de cada una de ellas.

Con todo, el debate no está cerrado. La construcción de Papadodimas y Raju resulta poco ortodoxa en física cuántica y AMPS —y otros— han cuestionado que pueda llevarse a cabo sin modificar ninguno de sus principios.

Por desgracia, no parece que ningún experimento en un futuro próximo vaya a ayudarnos a resolver la cuestión. Si existiesen los muros de fuego, sus efectos sobre los agujeros negros astrofísicos se verían atemperados por su intensa gravedad. E incluso si los aceleradores de partículas presentes o futuros consiguiesen crear copiosas cantidades de agujeros negros microscópicos —algo que se antoja cada vez más improbable a la vista de los resultados del LHC en el CERN—, estaríamos aún muy lejos de poder realizar el tipo de computación cuántica que decidiría el problema.

Sin embargo, a pesar de su carácter eminentemente teórico, no parece conveniente ignorar el reto. Muchos de los avances más radicales de la física han tenido su origen en las aparentes contradicciones entre teorías que, por separado, estaban bien establecidas. Por ello, tal vez la paradoja de la información se convierta en la contribución más importante y fructífera de Stephen Hawking a la física. Al fin y al cabo, son pocas las controversias capaces de atrapar la atención de los científicos y forzarles a generar nuevas ideas durante cuatro décadas.

***Roberto Emparan** es profesor de investigación ICREA en el departamento de física fundamental de la Universidad de Barcelona y en el Instituto de Ciencias del Cosmos, de la misma universidad.*

tein, de la Universidad de York). Tras fracasar repetidas veces, nos dimos cuenta de que el problema iba más allá de nuestras carencias matemáticas. Aún persistía una contradicción.

Esta aparece al considerar el entrelazamiento cuántico, el fenómeno menos intuitivo de la teoría cuántica y el más alejado de nuestra experiencia cotidiana. Si las partículas fuesen dados, dos partículas entrelazadas serían como dos dados que siempre suman siete: si al lanzar el primero obtenemos un dos, entonces sabremos que en el segundo aparecerá un cinco. De igual modo, cuando medimos las propiedades de una partícula que se encuentra entrelazada con otra, el resultado determina las propiedades de su pareja. La mecánica cuántica también dicta que una partícula solo puede estar completamente entrelazada con otra: si la partícula B se halla entrelazada con la A, entonces no puede estarlo a la vez con una tercera, C. Decimos que el entrelazamiento es «monógamo».

Pensemos ahora en un fotón de Hawking emitido después de que se haya evaporado, al menos, la mitad del agujero negro. Llamemos «B» a dicho fotón. El proceso de Hawking implica que B forma parte de un par de partículas entrelazadas, cuyo segundo miembro, «A», se ha precipitado en el agujero. Por otro lado, la información que anteriormente había caído en el agujero negro ha de estar repartida de algún modo en la radiación de Hawking emitida hasta entonces. Ahora bien, si la información no se pierde, y si el fotón saliente, B, acaba en un estado cuántico bien definido, entonces B ha de estar entrelazado con alguna combinación, «C», de partículas de Hawking radiadas con anterioridad (de lo contrario, el proceso borraría información). Pero entonces llegamos a una contradicción: ¡la poligamia!

Si fuera del agujero negro no ocurre nada extraordinario, el precio de salvar a la mecánica cuántica y preservar el entrelazamiento entre B y C es romper el entrelazamiento entre A y B. Pero, al igual que sucede con un enlace químico, romper el entrelazamiento cuesta energía. Los fotones A y B habían aparecido como un efímero par de partículas muy cerca del horizonte de sucesos. Para romper el entrelazamiento entre todos los pares de Hawking, el horizonte solo puede ser un «muro» de partículas de alta energía. Un astronauta que cayese en un agujero negro no se deslizaría con suavidad en él; en su lugar, se toparía con un muro de fuego.

Hallar una divergencia tan drástica con respecto a las predicciones de la relatividad general nos causó un gran desconcierto. Pero nuestro razonamiento era simple y no pudimos encontrar ningún fallo. En cierto modo, habíamos recorrido el razonamiento original de Hawking en sentido inverso: supusimos que la información no se perdía y vimos a dónde nos llevaba tal hipótesis. Descubrimos que, más que los sutiles efectos de la complementariedad, la relatividad general se desmoronaba. Al comentar nuestro resultado con otros investigadores, la reacción más común fue un escepticismo seguido de la misma perplejidad que habíamos experimentado nosotros.

O existen los muros de fuego, o habremos de abandonar algunos de nuestros principios cuánticos más arraigados. Por desgracia, estudiar los agujeros negros del mundo real no ayudará a resolver la cuestión, ya que cualquier radiación emitida por el objeto quedaría enmascarada por sus efectos gravitatorios, lo que haría el muro de fuego muy difícil de observar.

EL FIN DEL ESPACIO

Si existen los muros de fuego, ¿qué son? Una posibilidad es que marquen el final del espacio. Tal vez las condiciones para que se forme el espaciotiempo no se satisfagan en el interior de un agujero negro. Como ha apuntado Marolf, quizás el interior no pueda formarse porque «la memoria cuántica del agujero negro está llena». Si el espaciotiempo termina en el horizonte, un astronauta que lo toque se «disolverá» en bits cuánticos alojados en la frontera.

Para evitar situaciones tan estrafalarias, numerosos investigadores han intentado sortear el argumento que lleva a la existencia de muros de fuego. Una propuesta plantea que, dado que la partícula de Hawking B ha de estar entrelazada a la vez con A y con C, entonces A debe formar parte de C: el fotón que se halla tras el horizonte representa, de alguna manera, el mismo bit que la radiación de Hawking emitida con anterioridad, por más que uno y otra se encuentren muy separados. La idea recuerda a la noción original de complementariedad, pero parece que plasmarla en un modelo concreto también implica modificar la mecánica cuántica. La alternativa más radical, propuesta por Maldacena y Susskind, postula que dos partículas entrelazadas se hallan conectadas por un agujero de gusano espaciotemporal. De esta manera, una extensa región del espaciotiempo, como el interior de un agujero negro, podría construirse a partir de grandes cantidades de entrelazamiento.

Hawking propuso que la relatividad general funciona para los agujeros negros pero que la mecánica cuántica no. Maldacena llegó a la conclusión de que no hace falta modificar la mecánica cuántica, pero que el espaciotiempo es holográfico. Quizá la verdad se encuentre en algún punto intermedio.

Se han propuesto muchas otras ideas. La mayoría implican abandonar alguno de los grandes principios que llevaban largo tiempo con nosotros, pero no hay consenso acerca de qué dirección tomar. Una pregunta común es: ¿qué consecuencias tendrían los muros de fuego para los agujeros negros del mundo real, como el del centro de la Vía Láctea? Aún es pronto para decirlo.

Por el momento, la comunidad vive con emoción esta nueva contradicción entre dos teorías físicas fundamentales. Nuestra incapacidad para decidir si los muros de fuego existen o no ha sacado a la luz una limitación en las formulaciones actuales de la gravedad cuántica. Quizá de todo ello emerja una comprensión más profunda de la naturaleza del espacio y del tiempo, así como de los principios que subyacen a todas las leyes físicas. En último término, al desenmarañar los problemas que plantean los muros de fuego, tal vez obtengamos la clave para unificar la mecánica cuántica y la relatividad general.

PARA SABER MÁS

La guerra de los agujeros negros: Una controversia científica sobre las leyes últimas de la naturaleza. Leonard Susskind. Editorial Crítica, 2009.

Black holes: Complementarity or firewalls? Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski y James Sully en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2013, n.º 2, art. 62, febrero de 2013. Disponible en **arxiv.org/abs/1207.3123**

Cool horizons for entangled black holes. Juan Maldacena y Leonard Susskind en *Fortschritte der Physik*, vol. 61, n.º 9, págs. 781-811, septiembre de 2013. Disponible en **arxiv.org/abs/1306.0533**

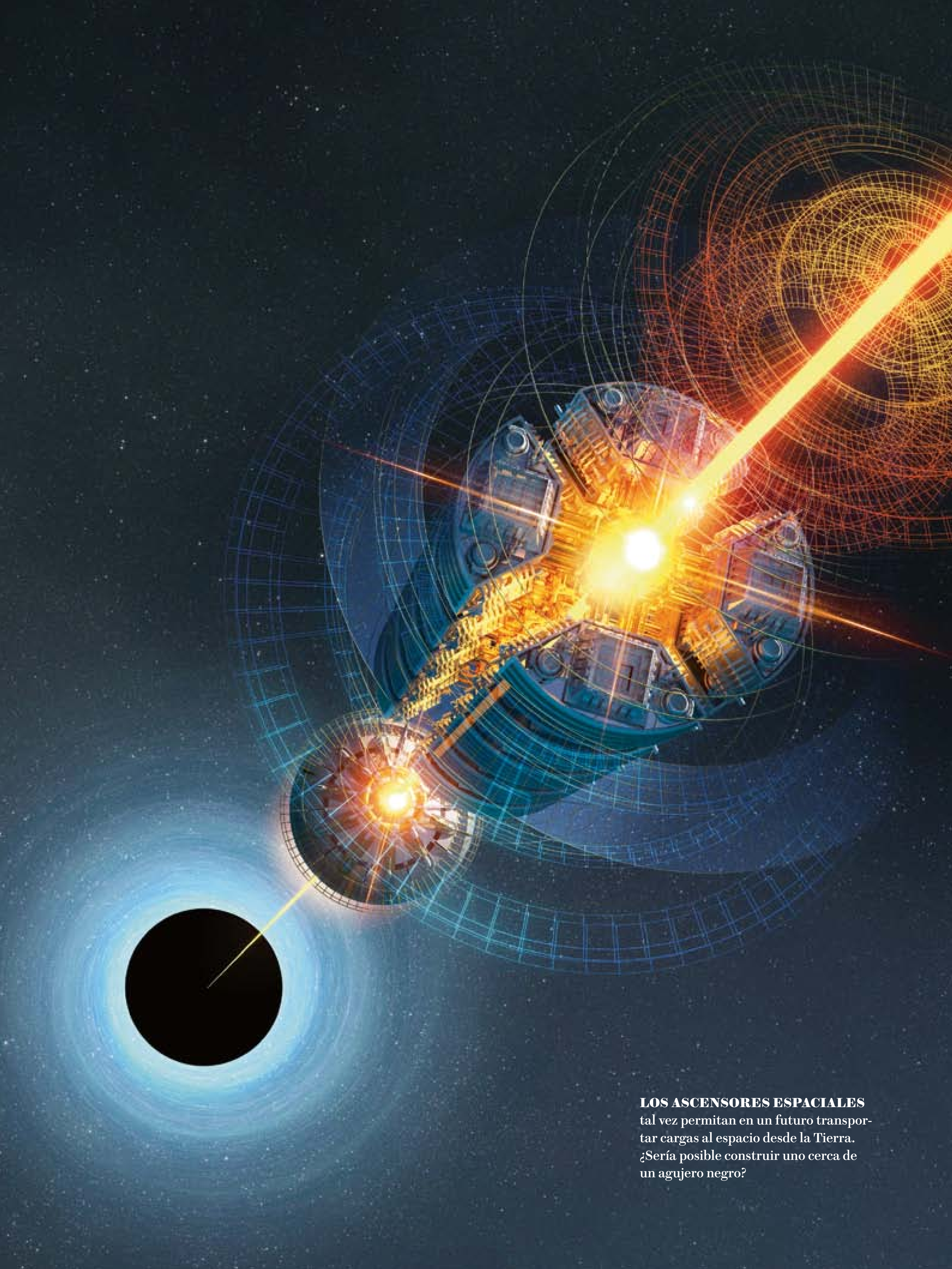
Black hole interior in the holographic correspondence and the information paradox. Kyriakos Papadodimas y Suvrat Raju en *Physical Review Letters*, vol. 112, 051301, febrero de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1310.6334**

EN NUESTRO ARCHIVO

Los agujeros negros y la paradoja de la información. Leonard Susskind en *IyC*, junio de 1997.

La información en el universo holográfico. Jacob D. Bekenstein en *IyC*, octubre de 2003.

El espacio, ¿una ilusión? Juan Maldacena en *IyC*, enero de 2006.



LOS ASCENSORES ESPACIALES tal vez permitan en un futuro transportar cargas al espacio desde la Tierra. ¿Sería posible construir uno cerca de un agujero negro?

FÍSICA

MINERÍA DE AGUJEROS NEGROS

¿Es posible extraer energía de las proximidades de un agujero negro? Según un resultado reciente, el dispositivo necesario violaría las leyes de la física

Adam Brown



Adam Brown es físico teórico en la Universidad Stanford. Sus investigaciones se centran en las propiedades matemáticas de los agujeros negros y en la cosmología teórica.

Tarde o temprano el Sol se apagará. Su combustible nuclear se agotará y, en caso de que la Tierra sobreviva, la humanidad se sumirá en un perpetuo invierno. En una situación así, nuestros descendientes se verían obligados a buscar otras alternativas energéticas. Primero consumirían los recursos del planeta, después los del sistema solar y, por último, los de todas las estrellas del universo observable. Cuando ya no quedase nada que quemar, seguramente fijarían su mirada en el único depósito de energía disponible: los agujeros negros. ¿Podrían aprovechar su energía?

Parece que no. Las razones por las que algo así resultaría inviable obedecen a las propiedades de las cuerdas cuánticas y a las características de un clásico de la ciencia ficción: el ascensor espacial.

FALSAS ESPERANZAS

A primera vista, extraer energía —o, de hecho, cualquier otra cosa— de un agujero negro parece imposible. Estos objetos se encuentran rodeados por un «horizonte de sucesos», una divisoria más allá de la cual nada puede escapar. Una bola de demolición que intentase derruir un agujero negro para liberar su energía sería aniquilada, tragada para siempre junto con su desafortunado operario. Arrojar una bomba al astro no haría más que incrementar ligeramente su tamaño, en una cantidad proporcional a la masa del artefacto. Nada que entre en un agujero negro, ya sea un asteroide o un cohete, vuelve a salir jamás. Ni siquiera la luz puede huir de su interior.



O eso creíamos. Sin embargo, en 1974, en el que a mi juicio constituye el artículo de física más exquisito e impactante de todos los tiempos, Stephen Hawking demostró que estábamos equivocados. A partir de algunas ideas propuestas con anterioridad por Jacob Bekenstein, hoy en la Universidad Hebrea de Jerusalén, Hawking demostró que, en realidad, los agujeros negros dejan escapar una pequeña cantidad de radiación. Por supuesto, siguen destruyendo todo lo que cae en ellos. Pero aunque los objetos no salgan de una pieza, su energía sí acaba filtrándose al exterior. Ello parece abrir la puerta a la posibilidad de explotar su energía.

El origen de dicha radiación se encuentra en la mecánica cuántica. Gracias al efecto túnel, las partículas cuánticas pueden atravesar obstáculos que, de otro modo, nunca salvarían. Una partícula que rueda hacia una barrera puede aparecer de repente al otro lado. No intente hacer algo así en casa: si se lanza contra una pared, es muy poco probable que se materialice ileso en la habitación contigua. No obstante, en el caso de una partícula microscópica, la probabilidad de que eso ocurra resulta mayor.

Es el efecto túnel lo que permite que una partícula alfa (un núcleo de helio) escape de un núcleo radiactivo como el de un átomo de uranio. Y es también dicho fenómeno el que posibilita que la radiación salga de un agujero negro. Las partículas de Hawking no cruzan la barrera gravitatoria «reventando» el horizonte de sucesos, sino deslizándose sutilmente hacia el otro lado por efecto túnel. Hawking demostró que la tasa de emisión de un agujero negro es muy baja, por lo que hasta ahora nadie ha observado dicha radiación. Sin embargo, constituye una consecuencia matemática tan convincente de aplicar las leyes cuánticas a un espaciotiempo curvo que hoy nadie duda de su existencia.

El hecho de que los agujeros negros permitan que la energía se filtre al exterior invita a pensar en la posibilidad de aprovecharla. Sin embargo, el diablo se encuentra en los detalles. No importa cómo intentemos succionar dicha energía, siempre aparecerán dificultades.

Una manera sencilla de atacar el problema consistiría en sentarse a esperar. Transcurrido un tiempo suficiente, el agujero negro acabará desembuchando toda su energía fotón a fotón. En el proceso, el astro irá encogiendo hasta desvanecerse por completo. Podemos pensar en un agujero negro como en una deliciosa taza de café cuya superficie está prohibido tocar so pena de desmembramiento gravitatorio. Sin embargo, siempre nos quedará una manera de degustarlo: esperar a que se evapore e ir aspirando su aroma.

No obstante, ese método conlleva un serio inconveniente. Aunque esperar es

EN SÍNTESIS

Los agujeros negros poseen una «atmósfera térmica» en las inmediaciones del horizonte de sucesos. Dicha envoltura se compone de partículas de Hawking que, debido al intenso campo gravitatorio, nunca lograrán escapar hasta el infinito.

En el pasado, varios investigadores han propuesto que esa energía podría extraerse con el dispositivo adecuado. En principio, bastaría con descolgar una caja amarrada a un cable hasta las proximidades del horizonte y llenarla de radiación.

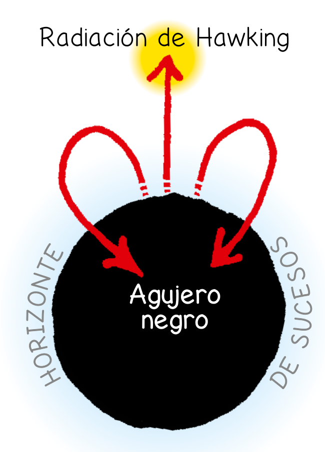
En un trabajo reciente, el autor ha demostrado que un cable capaz de resistir la gravedad sin romperse violaría las leyes de la física. Las cuerdas cuánticas parecen encontrarse justo en el límite, pero no podrían levantar ningún peso.

PÁGINA ANTERIOR: KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS; NIGEL HOLMES (*ilustraciones*)

fácil, deberíamos aguardar un tiempo insoportablemente largo. Un agujero negro con una masa equivalente a la del Sol radia a una temperatura de unos sesenta nanokelvin. Hasta los años ochenta, ni siquiera sabíamos como obtener temperaturas tan bajas en el laboratorio. Como consecuencia, un astro así tarda una asombrosa cantidad de tiempo en evaporarse: del orden de 10^{57} veces la edad del universo actual. En general, el tiempo de vida de un agujero negro crece como el cubo de su masa, m^3. Así pues, nuestros helados descendientes tendrían una buena motivación para querer acelerar el proceso.

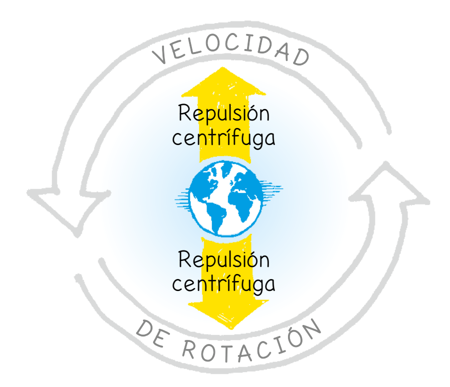
Hay una razón para el optimismo. No todas las partículas de Hawking escapan hacia el infinito. De hecho, casi ninguna lo hace. Casi todas las que atraviesan el horizonte de sucesos por efecto túnel vuelven a caer poco después en el agujero negro. Por tanto, si fuésemos capaces de atrapar esos fotones antes de que regresaran a las fauces del astro, tal vez podríamos recolectar más rápido su energía.

Para entender cómo cabría liberar esos fotones, hemos de explorar primero las fuerzas extremas que aparecen en las inmediaciones de un agujero negro. El motivo por el que la mayor parte de las partículas de Hawking vuelven a caer hacia el objeto se debe a que no son emitidas «en línea recta» hacia el exterior. Imaginemos que encendemos un láser justo en el exterior del horizonte de sucesos. Tendríamos que apuntar directamente hacia arriba para que la luz pudiera escapar. Y, cuanto más cerca nos encontremos del horizonte, con mayor precisión deberíamos hacerlo.



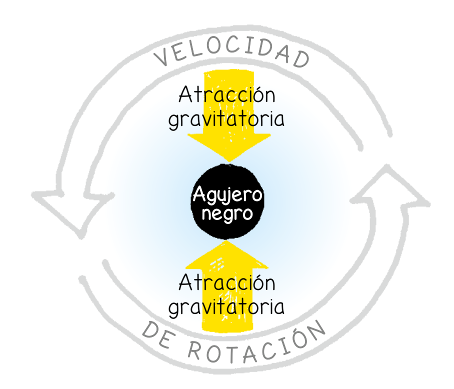
El campo gravitatorio reviste tal intensidad que, si nos desviamos mínimamente de la vertical, la luz dará media vuelta y acabará regresando al astro.

Tal vez resulte extraño que la velocidad orbital haga aún más difícil que una partícula escape. A fin de cuentas, es gracias al



movimiento orbital que la Estación Espacial Internacional no se precipita hacia la Tierra, ya que este le proporciona la fuerza centrífuga necesaria para contrarrestar la atracción gravitatoria.

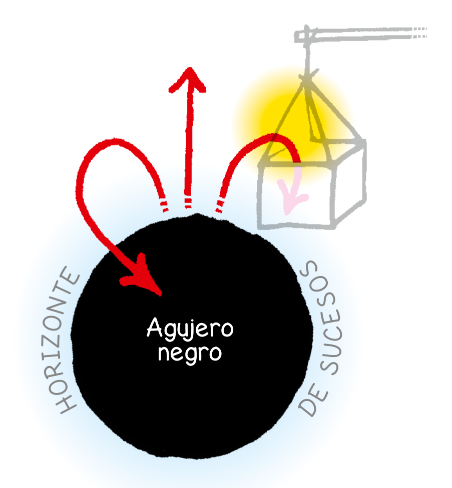
Sin embargo, la situación se invierte cuando nos acercamos demasiado a un agujero negro. En ellos, la velocidad orbital impide el escape. Ello se debe a la relatividad general, según la cual tanto la masa como la energía experimentan el efecto de la gravedad. En este caso, dicho



principio se aplica a la energía cinética orbital. En la vecindad del agujero negro (en concreto, dentro de un radio 1,5 veces mayor que el del horizonte de sucesos), la atracción gravitatoria debida a la energía cinética orbital supera a la repulsión centrífuga. Por tanto, dentro de ese radio, una mayor velocidad angular provocará que las partículas caigan más rápido.

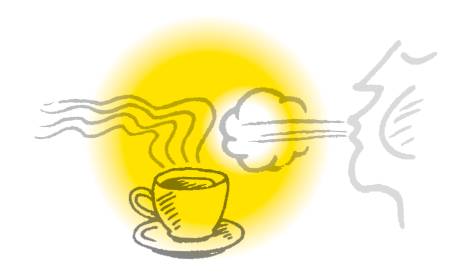
Lo anterior implica que, si nos acercamos lo suficiente al horizonte de sucesos de un agujero negro, comenzaremos a sentir calor, ya que no solo nos veremos rodeados por los fotones de Hawking que lograrán escapar hacia el infinito, sino también por aquellos que nunca lo conseguirán. Así pues, los agujeros negros se encuentran envueltos por una «atmósfera térmica»: cuanto más cerca nos encontremos del horizonte, más calor sentiremos. Y dicho calor transporta energía.

Dado que en las inmediaciones de un horizonte de sucesos hay energía almacenada, en el pasado varios investigadores han concebido astutas propuestas de «minería de agujeros negros». Estas consisten en acercar una caja al astro —sin que llegue a cruzar el horizonte—, dejar que se llene con la radiación de la atmósfera térmica y, una vez repleta, tirar de un cable para recuperarla.



Una fracción de la energía que atrapemos de esta manera habría escapado de todos modos en forma de radiación de Hawking, pero la mayor parte habría vuelto a caer en él de no haber sido por nuestra intervención. Una vez lejos del horizonte, transportar la energía hasta un planeta como la Tierra resultaría relativamente sencillo. Bastaría con cargar la caja en un cohete o convertir la radiación en luz láser y transmitirla a casa.

La estrategia puede compararse a soplar sobre nuestra taza de café. Si no lo hacemos, la mayor parte del vapor de agua volverá a caer en el líquido. Pero, si soplamos sobre la superficie, lograremos que el vapor recién emitido escape. Varios expertos han argumentado que, si atrapásemos la atmósfera térmica de un agujero negro de la manera adecuada, podríamos extraer toda su energía en un tiempo mucho menor que el que implicaría esperar a que se evaporase por sí solo. Dicho tiempo, en lugar de crecer como m^3, lo haría de manera proporcional a la masa del objeto, m.

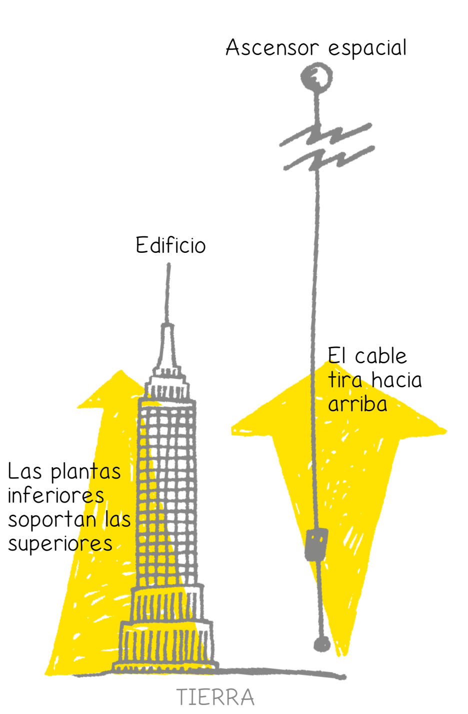


Al igual que nuestro empeño por viajar cada vez más rápido se encuentra limitado de manera fundamental por la velocidad de la luz, la resistencia de los materiales termina en $E = mc^2$

Sin embargo, en un trabajo reciente he demostrado que esa conjetura es falsa. El problema no radica en ningún sutil efecto cuántico ni en las propiedades de ninguna teoría cuántica de la gravedad, sino en una consideración de lo más mundana: es imposible construir un cable lo bastante resistente para sostener la caja cerca de un agujero negro. Para extraer su atmósfera térmica, necesitaríamos un ascensor espacial que violase las leyes fundamentales de la física.

ASCENSORES ESPACIALES

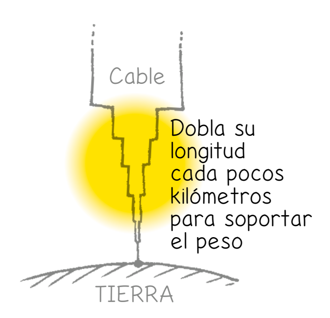
Los ascensores espaciales fueron popularizados por Arthur C. Clarke en su novela de 1979 *Las fuentes del paraíso*. Constan de un cable que pende del espacio exterior y que llega hasta la superficie de la Tierra. El cable no se encuentra sujeto desde abajo (como en un rascacielos, donde cada planta soporta a las superiores), sino desde arriba: cada segmento del cable tira de los que se encuentran debajo. El extremo más alejado está amarrado a un gran contrapeso situado en una órbita geoestacionaria. El equilibrio entre las distintas fuerzas asegura que el sistema permanezca flotando como por arte de magia —donde la magia, como dijo una vez Clarke, resultaría indistinguible de una tecnología lo suficientemente avanzada.



La ventaja de semejante construcción reside en que, una vez preparado el cable, poner una carga en órbita resultaría muy sencillo. Ya no sería necesario recurrir al riesgo y la ineficiencia de los cohetes, que, durante las primeras etapas de su viaje, hacen poco más que transportar su propio combustible. Con un ascensor espacial, bastaría con enganchar al cable un ascensor dotado de un motor eléctrico. Ello reduciría el coste marginal de transportar una carga hasta una órbita baja al precio de la electricidad. La factura por mandar un kilogramo al espacio pasaría de las decenas de miles de dólares que cobraba el transbordador espacial a un par de dólares. Un viaje espacial por el precio de un billete de metro.

Por supuesto, los obstáculos técnicos asociados a la construcción de un ascensor espacial son formidables. El mayor de todos radica en encontrar un material para el cable. Este tendría que ser muy resistente y, al mismo tiempo, muy ligero: resistente para que no se estire demasiado y se rompa, y ligero para no sobrecargar en exceso la parte superior.

El acero no cumple en absoluto con tales requisitos. Además de todo lo que se encuentra debajo, cada segmento del cable debe sostener su propio peso, por lo que su grosor ha de aumentar con la altitud. Dado el elevado peso del acero con relación a su resistencia, cerca de la superficie terrestre el grosor del cable debería



doblarse cada pocos kilómetros. Mucho antes de llegar al punto geoestacionario, alcanzaría un tamaño tan vasto que el proyecto nunca podría llevarse a cabo.

Jamás podremos fabricar un ascensor espacial con materiales del siglo XIX. Sin embargo, algunos materiales del siglo XXI parecen más prometedores. Los nanotubos de carbono, largas cadenas de átomos de carbono dispuestos según un patrón hexagonal, hacen gala de una resistencia mil veces mayor que la del acero. Construir un ascensor espacial con ellos costaría miles de millones y supondría, de lejos, el mayor proyecto de ingeniería de la historia. Tendríamos que apañárnoslas para entretejer los nanotubos hasta formar hilos de decenas de miles kilómetros de longitud, así como vencer un sinfín de dificultades adicionales. Pero, para un físico teórico como quien escribe, siempre que un proyecto así no viole las leyes de la física, todo lo demás es pura ingeniería. (Según este criterio, el problema de construir un reactor de fusión estaría ya «resuelto», a pesar de la notoria ausencia de tales dispositivos en nuestra civilización... con la honrosa excepción del Sol.)

INGENIERÍA EN UN AGUJERO NEGRO

Por supuesto, todo resultaría muchísimo más complicado en las inmediaciones de un agujero negro. El campo gravitatorio alcanza allí una intensidad enorme, por lo que una construcción que funcionase en la Tierra bien podría resultar patéticamente inadecuada en un agujero negro.

Puede demostrarse que, incluso con nanotubos de carbono, un hipotético ascensor espacial que llegase hasta el horizonte de sucesos de un agujero negro tendría que ser, o bien tan delgado cerca del astro que un solo fotón de Hawking acabaría destrozándolo, o bien tan grueso lejos de él que colapsaría bajo su propio peso y se convertiría, a su vez, en otro agujero negro.

Tales limitaciones descartan los nanotubos de carbono. Pero, al igual que a la

Edad del Bronce siguió la Edad de Hierro, y del mismo modo que tras el acero llegaron los nanotubos de carbono, cabe esperar que los expertos en materiales continúen descubriendo sustancias cada vez más ligeras y resistentes. Y tal vez lo hagan. Pero el progreso no puede continuar para siempre. Hay un límite para la relación entre peso y tensión de un cable que la ingeniería de materiales nunca podrá superar. Dicho límite está impuesto por las leyes de la naturaleza. En concreto, aparece como consecuencia de la célebre ecuación de Einstein $E = mc^2$.

La tensión de un cable nos indica cuánta energía hemos de invertir para estirarlo; cuanto más tenso esté, más nos costará alargarlo. Una goma elástica presenta una tensión porque, para redistribuir sus moléculas, hemos de invertir energía. Cuando un material nos permite recolocar sus moléculas con facilidad, su tensión es baja; en caso contrario, es elevada. Pero, en lugar intentar reordenar los elementos básicos que conforman un cable, siempre podemos optar por una estrategia más radical: crear una nueva sección de cable y unirla al extremo. El coste energético de estirar el cable mediante este procedimiento resulta igual a la energía contenida en la masa del nuevo segmento, dado por la fórmula $E = mc^2$: la masa de la nueva porción multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado.

Aunque semejante opción requiere invertir una enorme cantidad de energía, proporciona un método a prueba de fallos. Al mismo tiempo, implica un límite superior para el coste energético de estirar un cable y, por ende, para su tensión: esta nunca puede superar a la masa por unidad de longitud multiplicada por c^2. (Tal vez piense que dos sogas entrecruzadas darán lugar a un cable dos veces más resistente. Sin embargo, pesan también el doble, por lo que la relación entre tensión y masa no mejorará.)

Ese límite fundamental deja un amplio margen para el progreso técnico. La cota sobre la tensión que impone la ecuación de Einstein resulta cientos de miles de millones de veces superior a la resistencia del acero, así como cientos de millones de veces mayor que la de los nanotubos de carbono. Con todo, implica que no podremos mejorar nuestros materiales de manera indefinida. Al igual que nuestro empeño por viajar cada vez más rápido se encuentra limitado de manera fundamental por la velocidad de la luz, la resistencia de los materiales termina en $E = mc^2$.

Hay un material hipotético que justamente alcanza dicho límite. Uno tan fuerte como nunca podrá llegar a serlo ningún otro. Hablamos de una sustancia que jamás ha sido observada en ningún laboratorio; algunos físicos incluso dudan de su existencia, pero otros han dedicado sus carreras a estudiarla. Aunque no hayamos visto los cables más resistentes de la naturaleza, sabemos cuáles podrían ser: las cuerdas cuánticas de la teoría de cuerdas. Quienes investigan sus propiedades creen que dichos objetos se corresponden con los constituyentes fundamentales de la materia. Pero, para el propósito que nos ocupa, no nos importa cuán fundamentales sean, sino cuán resistentes.

Un cable fabricado con cuerdas cuánticas y que tuviese la misma longitud y peso que un cordón de zapatos podría sostener el Everest. Si deseásemos construir un ascensor espacial en un agujero negro, en ellas encontraríamos nuestra mejor opción. Allí donde los nanotubos de carbono fallan, las cuerdas tal vez tengan una posibilidad. Si nuestro problema de ingeniería puede resolverse de alguna manera, las cuerdas cuánticas bastarán. En cambio, si estas no lo logran, ningún otro material servirá.

Pero, si bien las cuerdas fundamentales son muy resistentes, no lo son lo suficiente. De hecho, se encuentran justo en el límite: un poco más fuertes, y podríamos construir un ascensor espacial que llegase hasta la superficie de un agujero negro; algo menos, y el proyecto estaría condenado al fracaso, ya que la cuerda acabaría rompiéndose por efecto de su propio peso. Las cuerdas cuánticas resultan estrictamente marginales en el sentido de que, si descolgáramos un cable hecho con ellas hasta un horizonte de sucesos, tendría la resistencia justa para soportar su propio peso, pero no le sobraría nada para levantar ninguna carga. Podría sostenerse a sí mismo, pero solo a costa de soltar la caja.

Así pues, los agujeros negros estarán siempre a salvo del pillaje energético. Las leyes de la naturaleza limitan los materiales de los que podemos disponer. Y aunque tal vez logremos construir un cable que penetre en su atmósfera térmica, este nunca podrá extraer su energía.

Dado que la resistencia de una cuerda cuántica se encuentra justo en el límite, siempre queda la posibilidad de emplear un cable algo más corto. Uno que solo llegue hasta las capas superiores de la atmósfera térmica, más enrarecidas, y arrebate de ellas algo de energía. Sin embargo, esa posibilidad no resulta mucho mejor que sentarse a esperar a que el agujero negro se evapore por sí solo. El tiempo que tardaríamos en succionar toda su energía seguiría creciendo como m^3, igual que la evaporación espontánea. Podríamos reducirlo en un pequeño factor, pero no cambiaríamos de manera sustancial las reglas del juego.

En última instancia, nuestro enemigo es la velocidad de la luz. Dado que resulta imposible viajar más rápido que la luz, nada puede escapar del interior de un agujero negro. Como no podemos extraer energía de ningún combustible por un valor superior a mc^2, el último recurso de una civilización futura serán los agujeros negros. Pero, debido a que la tensión de un cable no puede superar a su densidad lineal de masa por la velocidad de la luz al cuadrado, nunca podremos extraer su energía.

Cuando todas las estrellas se hayan apagado, comenzará un invierno perpetuo. Podremos echar mano del tesoro energético almacenado en las atmósferas térmicas de los agujeros negros, pero será a nuestro propio riesgo. Si lo hacemos de manera precipitada o nos adentramos demasiado en ellas, en lugar de extraer la radiación del agujero negro, este nos arrebatará la caja a nosotros. Sin duda, el invierno será frío.

PARA SABER MÁS

Acceleration radiation and the generalized second law of thermodynamics. William G. Unruh y Robert M. Wald en *Physical Review D*, vol. 25, n.º 4, págs. 942–958, febrero de 1982.

Tensile strength and the mining of black holes. Adam R. Brown en *Physical Review Letters*, vol. 111, 211301, noviembre de 2013. Disponible en **arxiv.org/abs/1207.3342**

EN NUESTRO ARCHIVO

La mecánica cuántica de los agujeros negros. Stephen W. Hawking en *IyC*, marzo de 1977.



COMO ESTE NIÑO, hospitalizado por paludismo, 200 millones de personas contraen el parásito cada año, la mayoría de ellas de África, donde el elevado precio de los tratamientos les impide acceder a ellos.





NUEVA MIRADA A LAS PLANTAS MEDICINALES



En busca de nuevos fármacos contra el paludismo y otras patologías, se están realizando ensayos clínicos con remedios vegetales tradicionales. Los resultados son prometedores

Brendan Borrell



Brendan Borrell colaborador habitual de *Scientific American*, escribe sobre ciencia y medioambiente. Gracias a una beca de la Fundación Alicia Patterson, que promueve el periodismo, en 2013 viajó a Uganda para investigar sobre las plantas medicinales.

LA MUJER FULANI, ALTA Y ESBELTA, SE DIRIGÍA A LA TRADICIONAL CHOZA DEL CURANDERO con el porte de una princesa. Al igual que otros miembros de esta tribu de nómadas del sur de Mali dedicada al pastoreo vacuno, llevaba un vestido azul, largo y ligero, tenía los labios pintados con índigo y jena y adornaba sus orejas con dos magníficas medialunas de oro. Una vez en el interior de la choza, sin embargo, el viejo curandero vio más allá de su elegancia. La mujer se hallaba débil a causa de su maternidad reciente, la palidez de las palmas de sus manos indicaba anemia y su frente ardía. Estaba tan exhausta que desfallecía al relatar su infortunio. «*Soumaya*», declaró el curandero. Paludismo.

Con ese diagnóstico, los dos médicos occidentales presentes en la consulta, Bertrand Graz, de la Universidad de Lausana, y Merlin Willcox, de la Universidad de Oxford, iniciaban su trabajo. La mujer firmó un consentimiento informado, narró sus antecedentes médicos y autorizó que le tomaran una muestra de sangre para realizar el recuento del parásito y otros análisis. Iba a participar en un importante estudio destinado a determinar la tasa de curación de una infusión a base de hojas de una amapola de color amarillo. A los tres días, en una visita de seguimiento, la mujer se encontraba bien y en vías de recuperación.

A pesar de que muchos de los medicamentos autorizados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. proceden del mundo natural, no suelen realizarse ensayos clínicos con plantas medicinales. El enfoque clásico para descubrir medicamentos en la naturaleza implica el aislamiento de compuestos puros de plantas, hongos o bacterias. Después, en el laboratorio se seleccionan y optimizan las sustancias prometedoras. Se evalúa su seguridad en animales y, solo si esta queda garantizada, se inician los ensayos con humanos. Pero pocos se atreverían a contradecir que este enfoque resulta ineficaz: el 95 por ciento de los fármacos experimentales no superan los ensayos clínicos. Tras demasiados fracasos, las compañías farmacéuticas han dado la espalda a los productos naturales. Pero la alternativa, el análisis de enormes quimiotecas de compuestos sintéticos en diminutos viales, tampoco ha logrado más éxito.

Ante esta situación, Graz y Willcox tratan de invertir el paradigma de la investigación de los productos naturales. Para ello, comienzan el proceso mediante estudios con humanos y solo más tarde aíslan los compuestos activos. El primer paso consiste en observar a pacientes que reciben remedios tradicionales a base de plantas con el objetivo de identificar el más prometedor. A continuación, se realiza un ensayo clínico con el remedio en cuestión. Finalmente, se identifica la sustancia activa que representará el punto de partida de la investigación farmacológica. El origen de su estrategia, denominada farmacología inversa, se sitúa en los métodos empleados por los científicos indios para descubrir nuevos medicamentos a partir de la medicina ayurvédica ancestral. El aspecto más interesante de su método es que, aunque no logren comercializar un producto, ofrecen consejos a los curanderos tradicionales y a su comunidad acerca de la eficacia de cada planta. Además, la investigación puede realizarse con un presupuesto asequible para los países en vías de desarrollo, ya que las primeras etapas requieren poco más que papel y lápiz. Los estudios sobre cierta amapola en Mali constituyen una prueba del potencial de esta estrategia e, inesperadamente, algunas instituciones sanitarias internacionales han dado una segunda oportunidad a las plantas medicinales.

EN SÍNTESIS

En las últimas décadas, se ha observado que los métodos clásicos de investigación farmacológica, en los que se analizan los compuestos in vitro y en animales antes de iniciar los ensayos en humanos, han dado lugar a pocos medicamentos comercializados.

Algunos científicos, por consiguiente, optan por un enfoque diferente. Estudian a pacientes ya tratados con remedios vegetales tradicionales y, a continuación, investigan en el laboratorio el más prometedor.

LEGADO DE FRACASOS

Numerosos medicamentos muy reconocidos hoy en día, como la aspirina y la codeína, surgieron del estudio de plantas utilizadas por los humanos (etnobotánica). Sin embargo, en la actualidad pocas veces se alcanza este resultado. La dificultad radica en la inexistencia de un protocolo claro para determinar las propiedades de una planta antes de invertir millones de dólares en investigación farmacológica. Por otro lado, la etnobotánica fue siempre más descriptiva que analítica. Los antropólogos se encontraban con los chamanes del Amazonas y se documentaban sobre las plantas y los métodos que empleaban, pero en pocas ocasiones permanecían en el lugar para evaluar la eficacia de estos brebajes.

Por otro lado, la simple recolección y análisis de todas las posibles especies de interés no tiene por qué dar los frutos deseados. Puede que un compuesto químico extraído, purificado y que ofrece resultados en ratas o en placas de Petri no sea seguro y eficaz en humanos. De la misma manera, lo opuesto también es posible. Además, tal vez algunos productos vegetales presenten mecanismos de acción desconocidos que pasen inadvertidos en los análisis habituales. En 1990, Merck, en colaboración con el Instituto Nacional de Biodiversidad de Costa Rica, llevó a cabo un interesante intento de bioprospección y elaboró un inventario con todas las palmeras o gorgojos de los parques nacionales del país para evaluar sus propiedades farmacéuticas. El proyecto se abandonó hace seis años sin alcanzar ningún éxito relevante.

PÁGINAS ANTERIORES: ANDREA BOLOGNESI (*niño*); MARY E. EATON, *NATIONAL GEOGRAPHIC* (*cardosanto*)





UN NIÑO CON PALUDISMO recibe la infusión de cardosanto (*Argemone mexicana*) durante un estudio en Mali (*izquierda*), donde los curanderos tradicionales llevan tiempo utilizando esta planta (*derecha*).

CORTESÍA DE MERLIN WILLCOX

En resumidas cuentas, las grandes compañías farmacéuticas decidieron trabajar con compuestos que pudieran sintetizar ellas mismas y, sin duda, a sus abogados les resultaba más sencillo reivindicar las patentes para ellas. Hoy en día, estas empresas analizan millones de estos compuestos mediante un proceso automatizado, denominado cribado de alto rendimiento, en busca de indicios de actividad biológica.

No cabe duda de que la identificación de un compuesto biológicamente activo representa tan solo el primer paso de un largo procedimiento. En Estados Unidos, desde que se inicia la investigación farmacológica hasta que se logra la autorización del medicamento transcurren doce años y el coste asciende a unos 800 millones de dólares. Los fracasos más terribles, como el adelgazante de Sanofi-Aventis (Acomplia) o el fármaco para reducir el colesterol de Pfizer (Torcetrapib), que fallaron en la última fase de los costosos ensayos clínicos, han puesto de relieve la ineficacia de este modelo en el mundo desarrollado. Las consecuencias han sido incluso peores en el caso de las enfermedades desatendidas en los países en vías de desarrollo, donde la mayoría de la población no puede adquirir los medicamentos que suelen fabricarse en el extranjero.

La ausencia de fármacos nuevos y el precio prohibitivo de los actuales constituye un grave problema, especialmente por lo que respecta al paludismo. Cada año, este parásito transmitido a través de mosquitos infecta a 200 millones de personas en los países tropicales y causa medio millón de muertes. El patógeno ha desarrollado resistencias frente a todos los fármacos existentes. En África, donde se concentra el 85 por ciento de todos los afectados, los tratamientos de elección, es decir, las politerapias a base de artemisinina, están subvencionados y en teoría se hallan disponibles en los centros de salud y en las tiendas de los pueblos. Sin embargo, el mal estado de las carreteras y el fácil acceso a otros medicamentos de peor calidad hacen que la eficacia de esta combinación de fármacos parezca mucho más atractiva de lo que resulta en la práctica. Los datos de una encuesta reciente en Mali revelaron que el 87 por ciento de los niños con paludismo se habían tratado inicialmente en casa y un 25 por ciento de ellos había recibido solo medicamentos tradicionales. Teniendo en cuenta estos factores, algunos investigadores opinan que merece la pena conocer con mayor detalle las prácticas antiguas. Pero el tiempo apremia. La medicina tradicional en África y en otras regiones del mundo se ve amenazada por la modernización y la competencia agresiva de los fabricantes chinos de productos vegetales, que ya han llegado hasta pueblos remotos.

EL PODER DE LAS PLANTAS

La idea de la farmacología inversa fue desarrollándose, a través de un proceso de prueba y error, cuando Graz y Willcox empezaron a analizar la amapola de Mali. Graz es un acérrimo defensor de los estudios observacionales, en los que se extraen conclusiones después de examinar los efectos de un determinado tratamiento. Tales estudios se diferencian de los ensayos clínicos aleatorizados, que asignan al azar pacientes a un grupo de tratamiento o a un grupo de control. Graz reconoce que el ensayo clínico comparativo y aleatorizado constituye la única manera de verificar la eficacia de un medicamento. Pero también apunta que este suele llevarse a cabo en condiciones poco realistas donde solo participa un subgrupo de la población de pacientes. Aunque los estudios observacionales no son experimentos, el hecho de recopilar y analizar datos de personas que acuden al consultorio permite obtener una idea más precisa de lo que funciona en el mundo real.

Esa doble opinión llevó a Graz a viajar a Mali en diciembre de 2002. Su propósito era realizar un tipo de ensayo observacional, que él mismo inventó y denominó «estudio retrospectivo sobre los efectos del tratamiento», con la colaboración de Drissa Diallo, director del departamento de medicina tradicional en el Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública de Mali. Durante numerosos meses, su equipo visitó hogares donde un miembro de la familia había contraído paludismo hacía poco.

Graz registró 66 plantas administradas a estos pacientes, ya sea de forma individual o combinada, para tratar la enfermedad. El porcentaje de fracasos era elevado. Pero había un dato esperanzador: de los 952 pacientes estudiados, 30 recibieron infusiones a base de hojas de *Argemone mexicana*, o cardosanto, una amapola procedente de México presente en el continente africano desde los inicios del siglo XIX. Todos los que la consumieron mostraron una recuperación completa. El estudio podía equipararse a un cribado de alto rendimiento pero con humanos, lo que otorgó aún mayor relevancia a los resultados.

Graz comunicó las novedades a Willcox, que había dirigido varios ensayos clínicos, con resultados diversos, sobre plantas con actividad antipalúdica. Ambos habían acordado que, si el primero descubría una planta aparentemente eficaz en su estudio retrospectivo, el segundo iniciaría un estudio de cohortes (seguimiento de un grupo de pacientes durante un período de tiempo) y, a continuación, un ensayo clínico. Sin embargo, cuando Graz acudió a un cibercafé en Sikasso, en el sureste de Mali, para recopilar información sobre esta planta, descubrió un dato alarmante en un artículo titulado «*Argemone mexicana* poisoning: Autopsy findings in two cases». En 1998, más de 3000 personas enfermaron en Delhi y más de 65 fallecieron a causa de una inflamación por acumulación de linfa. Todas ellas habían ingerido aceite de semillas de mostaza adulterado con *A. mexicana*, que contiene el compuesto tóxico sanguinarina.

Ese descubrimiento inquietó a Graz y Willcox, quienes se preguntaron si el remedio en cuestión podría acabar con la vida de los pacientes, en lugar de curarlos. Existen numerosos fármacos que a dosis incorrectas pueden resultar mortales, aunque ello no parecía suceder en Mali. Los investigadores intentaron calcular la dosis letal de la infusión de *Argemone* mediante la administración de dosis crecientes a ratones, pero no observaron síntomas patológicos. Al final, descubrieron que la sanguinarina se localizaba únicamente en las semillas de la planta, no en las hojas empleadas para elaborar la infusión.

Los científicos podían continuar sus estudios con la conciencia tranquila. En septiembre de 2004, Willcox viajó a Missidougou, un pueblo de Mali. El jefe Tiemoko Bengaly, un curandero tradicional que había aprendido a utilizar *A. mexicana* gracias a su abuelo, aceptó participar en la investigación. Contrariamente al estudio retrospectivo de Graz, centrado en casos previos, el estudio prospectivo de Willcox consistió en llevar a cabo un seguimiento de los pacientes, lo que permitió obtener datos más precisos y realizar análisis clínicos.

Willcox instaló un resplandeciente panel solar en el tejado de paja de la casa de adobe del curandero y lo conectó a una batería de coche para poner en marcha microscopios, centrífugas y un electrocardiógrafo. Advirtió a Bengaly acerca de la toxicidad de las semillas para que las retirara de la planta antes de preparar la infusión, pero le permitió emplear su propia receta: hervir las hojas durante tres horas en un perol negro con fuego de leña. En plena época de lluvias, casi cien personas aguardaban para ser examinadas en el primer día de estudio.

Inicialmente, Bengaly prescribió una única dosis de infusión durante tres días, pero Willcox observó que los pacientes no se recuperaban. Al preguntarle si tal resultado era normal, Bengaly contestó que la dosis que había empleado era más «científica». Willcox, preocupado y desconcertado, deseaba conocer la dosis habitual, pero Bengaly carecía de respuesta; solía proporcionar a los pacientes las plantas secas y recomendaba beber cuanto pudieran durante alrededor de una semana. Tras aplicar esta dosis superior, sí se observaron resultados. El recuento de parásitos descendió de 30.000 por microlitro de sangre a menos de 2000. Transcurridas dos semanas, el 89 por ciento de los pacientes adultos ya no tenían fiebre. Parecía que el cardosanto funcionaba.



LA QUININA obtenida de la corteza del quino se ha empleado durante cientos de años para tratar el paludismo.

GETTY IMAGES

Para verificar la eficacia de la planta era necesario trasladar ese proceso de investigación farmacológica poco ortodoxo a un ensayo clínico comparativo. Para ello, se inició un ensayo en Missidougou en el que participaron 301 pacientes. Se les asignó al azar una dosis normalizada de infusión de *A. mexicana* o la politerapia a base de artemisinina y se les hizo un seguimiento durante 28 días. El estudio, publicado en 2010, mostró que un 89 por ciento de los enfermos que habían recibido el cardosanto se recuperaron, en comparación con un 95 por ciento de los que habían seguido la politerapia. El coste completo del ensayo con *A. mexicana*, a cargo de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, ascendió a 500.000 dólares. Willcox y Graz estiman que el empleo de la fitoterapia, en vez de la politerapia con artemisinina, supondría un ahorro del 75 por ciento de los costes.

Las pruebas de ese estudio, aunque preliminares, son tan convincentes que se ha considerado recomendar la infusión de *A. mexicana* en Mali y otras regiones donde se podría cultivar y utilizar para tratar adultos que sufren paludismo no potencialmente mortal. Esta estrategia podría evitar que el parásito desarrollara resistencias frente a los fármacos actuales y permitiría reservar los escasos medicamentos para los pacientes más graves, con riesgo de daño cerebral o muerte.

En la siguiente fase del proceso, la farmacología inversa se asemeja a la investigación tradicional, ya que se aíslan los compuestos activos de *A. mexicana*, se optimizan sus propiedades químicas y se ensayan en roedores y en humanos a través de estudios clínicos más al uso. Sin embargo, a diferencia de los modelos de investigación clásicos, en los que los compuestos analizados son tan abundantes que se abandonan al primer signo de dificultad, la farmacología inversa analiza compuestos con una eficacia y seguridad ya demostradas. De hecho, en el modelo tradicional *Argemone* ya se habría descartado, puesto que el compuesto con mayor actividad in vitro, la berberina, no logró eliminar el parásito en ratones y humanos. Aún se desconoce el motivo por el cual la planta entera se muestra tan eficaz, un enigma que Graz y Willcox esperan averiguar en futuros estudios.

PROMESAS Y PELIGROS

La farmacología inversa resulta especialmente apropiada en la identificación de nuevos fármacos para enfermedades agudas

de fácil seguimiento, como el paludismo, pero su utilidad no se limita a este campo. Hace cerca de una década, en India, un consorcio de universidades, institutos de investigación y empresas farmacéuticas empezaron a aplicarla para descubrir nuevos fármacos para la artritis, la diabetes y la hepatitis a partir de sustancias empleadas en la medicina ayurvédica tradicional. Tras realizar encuestas en todo el país a médicos ayurvédicos, Arvind Chopra, del Centro para Enfermedades Reumáticas de Pune, y sus colaboradores elaboraron una breve lista de plantas prometedoras para la artritis e iniciaron estudios observacionales en diversos centros sanitarios junto con estudios farmacológicos con animales. En agosto de 2013 publicaron en *Rheumatology* los resultados de un ensayo con 440 pacientes donde demostraron que la combinación de cuatro extractos de plantas reducía la gonartralgia y mejoraba la actividad de la rodilla con una eficacia similar al celecoxib (Celebrex de Pfizer).

Mientras tanto, Graz y Willcox divulgaban la farmacología inversa e impartían cursos de formación dirigidos a científicos africanos que buscaban plantas medicinales para aumentar la producción de leche materna o aliviar los síntomas en la infección por el VIH. En diciembre de 2013, Graz se desplazó a Palaos, en el Pacífico, clasificado como el séptimo país con mayor número de obesos del mundo, con objeto de identificar medicamentos tradicionales para la diabetes y la hipertensión. Su estudio retrospectivo sobre 30 plantas reveló que el consumo de *Morinda citrifolia*, una árbol de la familia del café, se asociaba a una pérdida de peso, y el de *Phaleria nisidai*, a una menor glucemia. En la actualidad se está realizando un ensayo clínico con *P. nisidai*. El hecho de descubrir un nuevo fármaco para la diabetes, una patología que afecta a decenas de millones de personas en el mundo desarrollado, podría revitalizar la investigación de productos naturales por parte de las empresas farmacéuticas.

Aún quedan escépticos con respecto a este nuevo enfoque de la investigación farmacológica. Es el caso de Nicholas White, actualmente en Oxford, que conoce de primera mano la importancia de la medicina tradicional. En 1979 leyó un artículo remoto en un periódico chino sobre una planta llamada *quinghao* (*Artemisia annua*) que se había utilizado durante más de 2200 años para tratar el paludismo. En el laboratorio, identificó un compuesto activo, la artemisinina, e inició el habitual proceso de ensayos sobre seguridad para después, en los años noventa, demostrar su eficacia en ensayos clínicos con humanos. En otras palabras, se trataba de un éxito del modelo clásico de la investigación farmacológica, de ahí su escepticismo con respecto a la farmacología inversa. «Me parece un poco ingenuo», comenta. Una cosa es observar cómo trabajan los curanderos, pero realizar ensayos clínicos podría resultar poco ético.

Willcox y Graz están habituados a esos comentarios. Durante una presentación en una reunión de la Real Sociedad de Medicina e Higiene Tropical en Liverpool, un miembro del público señaló que los ensayos clínicos no cumplían con las directrices marcadas por los comités éticos de revisión británicos, las cuales disponen que médicos occidentales apliquen las normas occidentales de asistencia sanitaria. Se sugirió también que el esfuerzo y el dinero empleado en la investigación deberían haber sido invertidos en aumentar el acceso a los tratamientos habituales. Pero Willcox apunta que el dinero hubiera servido para tratar a personas durante dos años, tras lo cual la situación seguiría igual. Uno de los motivos por los que Diallo inició su colaboración fue porque Mali ya disponía de un sistema de aprobación de «plantas medicinales optimizadas» y deseaba ampliar la lista y descubrir nuevas pruebas más fiables. El estudio fue autorizado por un comité ético de revisión de Mali y, en la actualidad, el Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública del país está perfilando un jarabe normalizado de *A. mexicana* para su fabricación y distribución local.

Además, cuentan con un aliado inesperado, Medicines for Malaria Venture, con sede en Ginebra, la única organización centrada en la investigación de tratamientos antipalúdicos como alternativa a la vacuna. En ella trabajan veteranos de la industria farmacéutica y su cometido consiste en subvencionar proyectos que siguen el modelo clásico de la investigación farmacológica. Hace unos años financió a Novartis, GlaxoSmith y otros laboratorios farmacéuticos para que examinaran la actividad antipalúdica de más de seis millones de compuestos registrados en sus quimiotecas. Reunieron 25.000 sustancias potenciales. El estudio elevó el umbral de actividad que debía presentar un compuesto para que mereciera la pena seguir investigándolo, pero no favoreció el hallazgo de fármacos novedosos.

Al conocer los datos clínicos de *A. mexicana*, Timothy Wells, director científico de la organización, quedó realmente sorprendido. «Resulta menos eficaz que la politerapia con artemisinina, pero todavía no se ha optimizado», comenta. En el caso de la artemisinina se han diseñado derivados más solubles, mientras que los fármacos a base de quinina actuales han sido modificados a fin de aumentar su eficacia. Con el mismo objetivo, Medicines for Malaria Venture financia la siguiente fase de investigación sobre *A. mexicana* para identificar los principios activos y determinar su metabolismo en el organismo.

CRUZAR FRONTERAS

En enero de 2013, Willcox viajó a Missidougou para presentar sus condolencias a la familia del curandero Tiemoko Bengaly, fallecido el año anterior. En aquella época el ejército francés inició ataques aéreos contra militantes islamistas en el norte y el caos generado puso de relieve la necesidad de fuentes locales de medicamentos para la población africana. En 2010, el Fondo Mundial de Lucha contra el Sida, la Tuberculosis y la Malaria retiró una subvención de 18 millones de dólares destinada a combatir el paludismo debido a acusaciones de corrupción, y en 2012 anunció la interrupción del Servicio de Medicamentos Asequibles, que facilitaba subsidios a los importadores para suministrar medicamentos de calidad a las tiendas de los pueblos.

El objetivo de Willcox y Graz era determinar los efectos de sus recomendaciones acerca de *A. mexicana* sobre la salud pública; sin embargo, la difícil situación política no lo permitió. Willcox solo se atrevió a permanecer una semana más en el país. Una mañana, miró por la ventana del coche y divisó aquellas flores amarillas en un terreno sin explotar. Pensó en ellas como una solución provisional, algo a lo que recurrir cuando no existe nada mejor.

PARA SABER MÁS

Argemone mexicana decoction versus artesunate-amodiaquine for the management of malarian in Mali: Policy and public-health implications. Bertrand Graz et al. en *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 104, n.º 1, págs. 33-41, enero de 2010.

Improved traditional medicines in Mali. Merlin Willcox et al. en *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, vol. 18, n.º 3, págs. 212-220, marzo de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fármacos de origen vegetal de ayer y de hoy. Xavier Lozoya en *IyC*, noviembre de 1997.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO*
o 5 ejemplares de *TEMAS*
por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
   Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
   Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
   Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
   Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
   Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
   Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
   El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
   Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
   Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
   La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
   Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

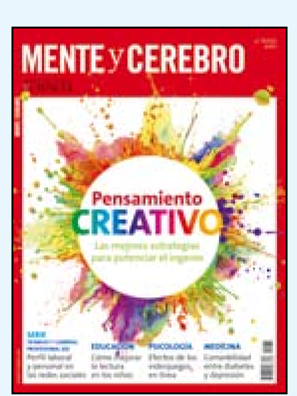
CATÁLOGO DE PRODUCTOS

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe

(*) Disponible solo en formato digital



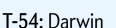


TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer

(*) Disponible solo en formato digital







MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones





por José David Flores Félix y Raúl Rivas González

Bacterias productoras de biocementos

Una nueva estrategia para recuperar y restaurar el patrimonio arquitectónico y escultórico

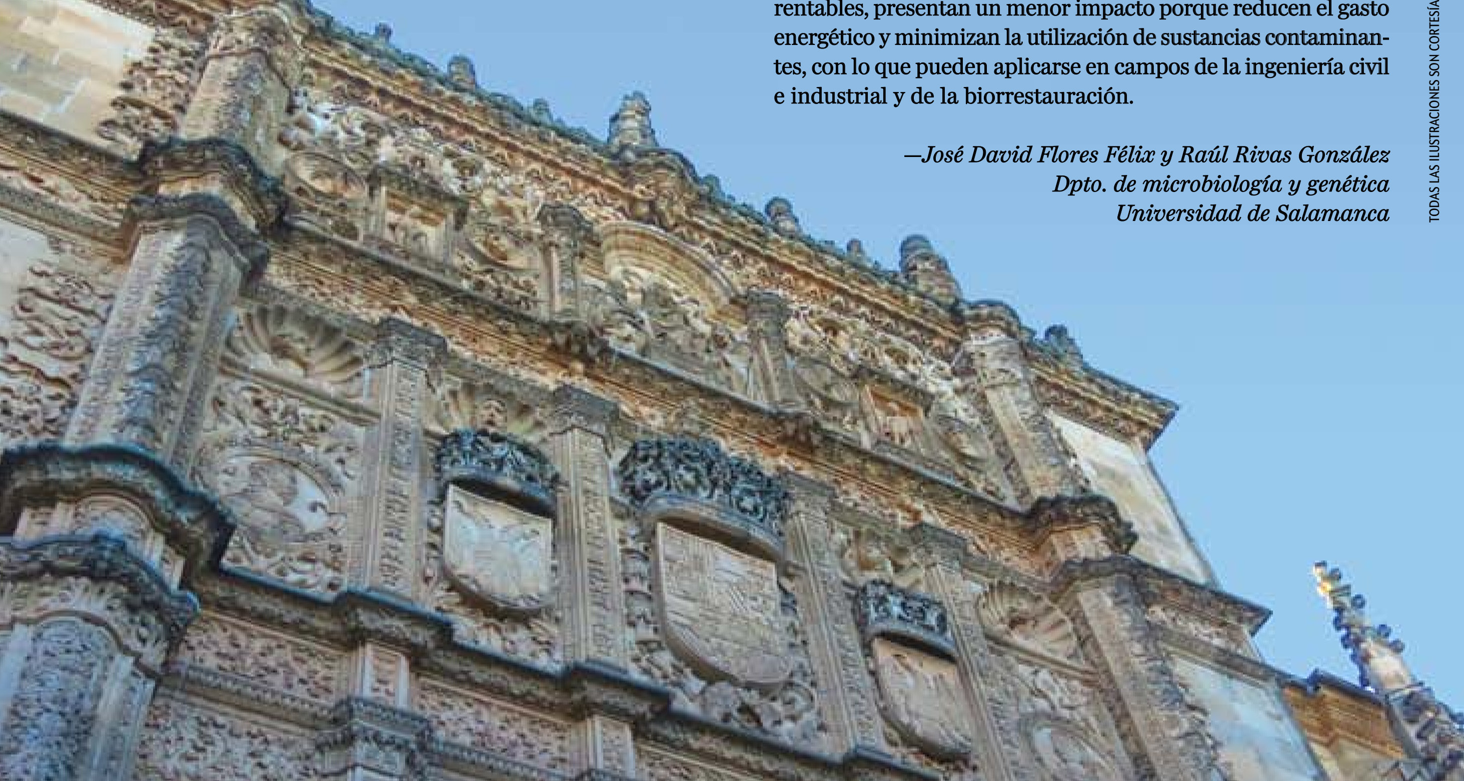
Los materiales de construcción como mármoles, dolomías o calizas están sometidos a una meteorización constante, con una disolución gradual de la matriz mineral, un aumento de la porosidad y una merma de las propiedades mecánicas de la piedra. Ello ocasiona el deterioro progresivo del patrimonio arquitectónico y escultórico mundial, lo que plantea un importante problema difícil de abordar. En los países occidentales, la conservación y restauración de bienes culturales está mediada por principios y procedimientos preestablecidos, el más conocido de los cuales es la Carta de Venecia de 1964.

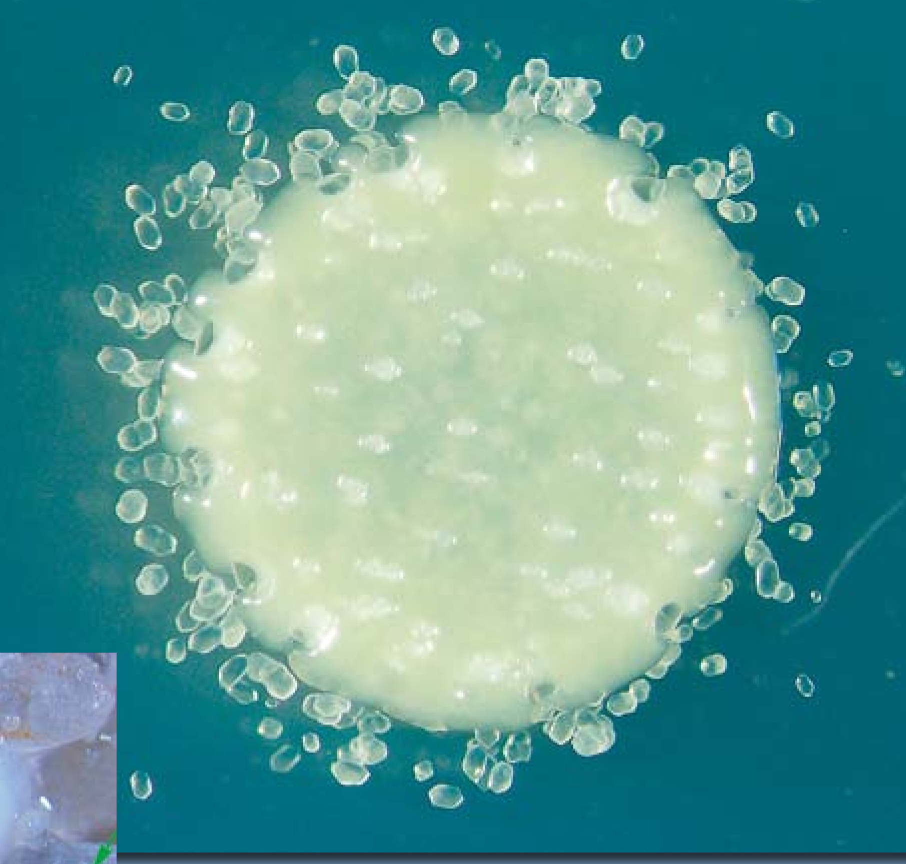
Algunas de las acciones empleadas para evitar el deterioro consisten en aplicar repelentes de agua o bien consolidantes artificiales de naturaleza inorgánica. Sin embargo, ambos métodos son objeto de controversia por su acción no reversible y su rendimiento limitado a largo plazo. Por otra parte, los tratamientos orgánicos (como las resinas epoxi o los alcoxisilanos) se aplican directamente sobre la roca y contribuyen a la contaminación ambiental; además, a menudo conllevan efectos indeseables, al favorecer la aparición de películas nocivas para la piedra. Algunos investigadores abogan por tratamientos inorgánicos con soluciones saturadas de hidróxido de calcio, aunque hasta el momento no han tenido éxito, debido principalmente a que tienden a crear costras superficiales y duras o presentan una escasa penetración.

Por fortuna, en tiempo reciente se ha desarrollado una alternativa que consiste en aplicar bacterias que inducen la precipitación de carbonato. Esta estrategia resulta muy prometedora, ya que se ha comprobado que las bacterias no solo colonizan la superficie de la piedra, sino que también se adentran en ella, ocupan sus poros y forman precipitados de carbonato consistentes. Se obtiene un biocemento eficaz y muy coherente que tiene la capacidad de consolidar un amplio espectro de materiales. La ventaja de este tratamiento es que se crea un producto muy similar al de la piedra tratada, ya que imita el proceso natural de formación de la piedra calcárea. Nuestro grupo dedica una parte de sus investigaciones a la caracterización y aplicación de nuevas bacterias precipitadoras de carbonato cálcico que podrían emplearse en la biorrestauración.

Las bacterias calcificadoras están demostrando un enorme potencial biotecnológico. Además de ser económicamente más rentables, presentan un menor impacto porque reducen el gasto energético y minimizan la utilización de sustancias contaminantes, con lo que pueden aplicarse en campos de la ingeniería civil e industrial y de la biorrestauración.

—José David Flores Félix y Raúl Rivas González
Dpto. de microbiología y genética
Universidad de Salamanca

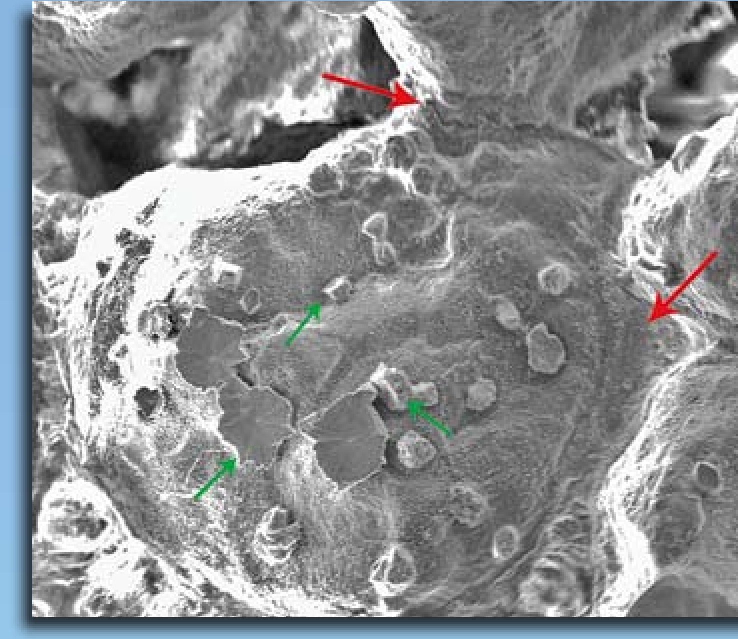




▶ CRISTALES DE CARBONATO CÁLCICO alrededor de una colonia de *Citricoccus*, uno de los géneros bacterianos con potencial para ser utilizados como biocementadores.

▼ LA CALCITA (*flechas rojas*) que producen las bacterias biocalcificadoras cristaliza sobre los clastos (partículas minerales) silíceos (*flechas verdes*). El proceso compacta el material y mejora su resistencia frente a agresiones ambientales. (Imagen obtenida mediante lupa estereoscópica.)





▶ REPARACIÓN Y CONSOLIDACIÓN. Las bacterias biocementadoras unen entre sí los clastos silíceos de la microestructura pétrea mediante el carbonato cálcico que producen (*flechas rojas*). En algunas zonas se observa el inicio del proceso de cristalización (*flechas verdes*), que al avanzar recubrirá por completo la partícula mineral. (Imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido.)





◀ LA AGRESIÓN MECÁNICA que sufría esta roca (*flecha roja, imagen izquierda*) se ha reparado después de tres meses de tratamiento con bacterias precipitadoras de carbonato cálcico (*derecha*).

por Elena Serrano



Elena Serrano es investigadora postdoctoral en el Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia en Berlín.

Mujeres y ciencia en la España de la Ilustración

Ciencia en sitios insospechados

Desde el mes de octubre de 1787, cada viernes, a las 4 de la tarde en invierno y a las 6 en verano, la duquesa de Osuna cruzaba la plaza de la Villa en Madrid y entraba en la sala capitular del Ayuntamiento. Sentada a la cabecera de la mesa principal, presidía durante dos horas una asociación sin equivalente en la Europa del siglo dieciocho: la Junta de Damas de Honor y Mérito.

En 1800, la Junta contaba con sesenta y cinco socias, la mayoría residentes en Madrid. Aristócratas o pertenecientes a la alta sociedad, habían tenido acceso por diferentes circunstancias a una educación excelente. Algunas dirigían tertulias en las que se reunían literatos, políticos, artistas y hombres de ciencia. Este era el caso de la condesa de Montijo, la duquesa de Fuerte Híjar o la propia duquesa de Osuna. Otras socias eran célebres por su erudición. Rosario de Cepeda había sido examinada públicamente en matemáticas, gramática, latín y filosofía natural —lo que hoy denominaríamos física— en la ciudad de Cádiz; Isidra Quintina Guzmán y de Lacerda fue nombrada primera mujer doctora en filosofía moderna por la Universidad de Alcalá de Henares, mientras que Josefa Amar y Borbón, hija de médico y educada por los libreros reales, era respetada por sus conocimientos médicos. En Tenerife, María de Betancourt y Molina, hermana del ingeniero, destacaba por sus invenciones en la industria textil.

La Junta era lo que en la época se denominaba una sociedad económica. De hecho, nació como la rama femenina de la Sociedad Económica Matritense de Amigos del País. Estas sociedades estaban inspiradas en la idea de que la educación de las clases populares y la investigación de problemas cotidianos (hacer pan con semillas casi desconocidas en Europa, aprovechar los restos de las cenizas de cocinar para hacer jabón, lograr un tinte resistente a los lavados, construir un horno que consumiera poco carbón) eran cruciales para mejorar la economía y la moral del país o, como se decía en la época, para lograr la «felicidad pública». Más de 200 de estas sociedades científicas florecieron en la segunda mitad del siglo en Europa y América, 80 de ellas en España. Sin embargo, aunque algunas sociedades económicas incorporaron «socias de honor» a título excepcional, no se conoce ninguna que fuera exclusivamente femenina.

¿Cómo llegó la Junta de Damas a situarse en un lugar tan prominente en el espacio público, nada menos que en el Ayuntamiento de la capital del imperio? ¿Cómo participó en la creación y difusión de conocimientos? El análisis de las complejas relaciones (negociaciones, altercados, alianzas) que esta institución mantuvo con las élites intelectuales masculinas del país nos ayuda a entender los vínculos entre ciencia, sociedad y política en la España de la Ilustración entre 1787 y 1808.



MARÍA JOSEFA PIMENTEL Y TÉLLEZ-GIRÓN, XII condesa-duquesa de Benavente y duquesa de Osuna, por Goya (1785).

WIKIMEDIA COMMONS, DOMINIO PÚBLICO

La doble condición de ser mujeres y de pertenecer a la clase alta culta confiere a las socias de la Junta una posición diferente a la del resto de los actores estudiados hasta ahora. Como se movían entre los elitistas centros de Madrid, tenían acceso directo a las nuevas prácticas científicas. Muchas de ellas eran esposas o hermanas de socios de la Económica Matritense; poseían extensas bibliotecas familiares con licencia de la Inquisición para comprar libros prohibidos; viajaban a París, que contaba por entonces con una de las mayores ofertas de cursos públicos de ciencia para mujeres; y contrataban a los médicos y profesores más prestigiosos para trabajar en sus casas. El hecho de ser mujeres, tradicionalmente vinculadas a obras caritativas en ámbitos considerados «femeninos», hizo que estas prácticas científicas llegasen a los sitios más míseros de la ciudad. En lo que resta de artículo, señalaremos algunas características de cómo nació la

Junta y cómo intervino en la construcción de la cultura científica de la época.

Una nueva sociedad científica

La Junta es bien conocida por los historiadores feministas. Entre otras cosas, porque su establecimiento no fue un proceso fácil. Desencadenó un virulento debate en la Sociedad Económica Matritense en el que participaron reformistas como Gaspar Melchor de Jovellanos y Francisco Cabarrús, y dos mujeres, la francesa Madame Levancher de Valincourt y Josefa Amar y Borbón, que defendieron el derecho de las mujeres a participar como socias de pleno derecho en la Sociedad Económica Matritense. El análisis de estos debates es una fuente inestimable para entender las ideas de los ilustrados acerca de la naturaleza femenina, y el modo en que hombres y mujeres percibían cada uno los diferentes roles en el espacio público. En *Discurso a favor del talento de las mujeres* (1786), Josefa Amar mina en 34 puntos todo argumento en contra de la admisión de las mujeres a la sociedad. Todavía hoy emociona leer cómo se enfrenta a las críticas de Cabarrús, según el cual las mujeres deben permanecer dedicadas al hogar y a sus familias, y cómo defiende la capacidad de estas para participar en las tareas de las sociedades económicas:

«[...] hacer nuevos inventos en las artes, perfeccionar los conocidos, estimular a los fabricantes, labradores y artesanos, a que trabajen con ventaja, y con perfección, calcular lo que falta en un país, y traerlo de otro en cambio de su sobrante por medio de un sabio comercio, aunque son cosas que piden meditación, y noticias, no son materias tan abstractas, que no las pueda comprender la mujer que tenga talento regular».

El 27 de agosto de 1787, el rey da fin a los debates. En lugar de permitir a las mujeres integrarse de pleno derecho en la Sociedad Económica Matritense, se crea una asociación paralela, con un cometido tan vago como servir de ejemplo a las demás. Sin embargo, las nuevas socias, poderosas, influyentes y cultas, utilizan esta plataforma para intervenir de manera decisiva en los problemas sociales de Madrid, empleando todas las herramientas a su alcance, incluida la ciencia.

Una ciencia útil

En 1800, la Junta de Damas dirigía cuatro escuelas patrióticas para enseñar a las niñas pobres de Madrid a hilar y tejer lino, cáñamo, lana y algodón; tres escuelas para aprender a hacer cintas, encajes, flores de tela y bordados; un taller textil que empleaba a trescientas mujeres; dos escuelas para huérfanos, y la Inclusa de Madrid, el hospital para niños abandonados. Además, muchas de las socias acudían semanalmente a la cárcel de mujeres de Madrid (La Galera) y a las salas de mujeres de La Villa y La Corte para intentar mejorar las condiciones materiales y espirituales de las presas. Las actividades de la Junta implicaban un conocimiento profundo de la ciencia del momento. Las socias experimentan con nuevas máquinas de hilar para ir más rápido, y prueban con nuevas formas de blanquear los algodones y las lanas y teñir las sedas. En las cárceles, además de medir el contenido de oxígeno de los calabozos, experimentan con métodos de purificación del aire junto con uno de los químicos más relevantes del momento, Pedro Gutiérrez Bueno. Pero, sobre todo, es en la Inclusa de Madrid donde la Junta lleva a cabo innovaciones más arriesgadas.

Es difícil, desde la mentalidad del siglo XXI, comprender la existencia de esos centros donde, en los meses de hambrunas, se abandonaban cada noche dos o tres niños, cuya probabilidad de sobrevivir era prácticamente nula. La Junta instaura medidas higiénicas y médicas: riego con vinagre de las estancias, separación de niños enfermos y sanos, control del pecho de amas de cría para evitar el contagio de sífilis a los niños. En experimentos hoy moralmente inconcebibles, la Junta intenta paliar la falta de amas de cría utilizando leche de cabras y burras, así como semillas tropicales. Se sabía que la leche de animales cambiaba sus propiedades según la alimentación y crianza; se pensaba que la forma de administrarla al niño también influía en su digestibilidad, y la Junta, al menos en tres ocasiones, se embarcó en estudiar el modo en que estos parámetros influían en la salud de los niños. Sabemos que la propia duquesa de Osuna llevó diarios de los experimentos. También que las socias se reunían con los doctores de la Inclusa y los médicos de la Real Academia de Medicina para discutir los resultados. Las conclusiones fueron publicadas y contribuyeron a los debates sobre los procesos de digestión y alimentación de los recién nacidos.

Como una típica sociedad dieciochesca, la Junta de Damas mantenía una extensa correspondencia. Algunas socias viajeras envían desde el extranjero lo que consideran útil para la actividad de la Junta: desde informes sobre manufacturas locales hasta semillas americanas que puedan servir para alimentar a los niños de la Inclusa; desde recetas para blanqueo de tejidos hasta esquemas de biberones. Las señoras mantienen correspondencia con artesanos valencianos y catalanes, que envían muestras de sedas teñidas y algodones para que estas comprueben su calidad e intercedan ante las autoridades para obtener privilegios. Escriben acerca de «la educación física» —lo que sería ahora un libro de puericultura— y moral de las niñas. Algunas traducen libros que se consideran de interés nacional para el conocimiento de sus compatriotas. Josefa Amar y Borbón traduce del italiano un tratado de agricultura. La duquesa de Espeja, el *Lenguaje de los cálculos,* un tratado póstumo del filósofo Étienne de Condillac. La marquesa de Fuerte Híjar traduce la biografía y el relato de las teorías científicas de un personaje enormemente influyente en la época, Benjamin Thompson, conde de Rumford. Aunque hoy se le conoce por sus teorías sobre el calor, en la época fue sobre todo célebre por sus «sopas económicas» y sus hornos que ahorraban combustible, ambos inventos promocionados por la Junta.

La historia de la Junta de Damas nos invita a pensar en la ciencia como actividad inextricablemente unida a su contexto político y social, no como una empresa aislada practicada en laboratorios, universidades o instituciones científicas. Nos lleva a reconocer que, a veces, se puede hacer ciencia y crear conocimiento en sitios insospechados, y por gentes que no responden a los arquetipos que tenemos de los científicos, como la duquesa de Osuna.

PARA SABER MÁS

María Francisca de Sales Portocarreño, Condesa del Montijo: Una figura de la Ilustración. P. Demerson. Editora Nacional, Madrid 1975.

Las mujeres en la cultura de la Ilustración. M. Bolufer en *Ilustración, ciencia y técnica en el siglo XVIII*, coordinado por E. Martínez Ruiz, M. de Pazzis y Pi Corrales, págs. 209-232. Universidad de Valencia, Valencia, 2008.

Beyond the Academy: Histories of gender and knowledge. Coordinado por C. Oertzen, M. Rentetzi y E. Watkins en *Centaurus*, vol. 55 (número especial), 2013.

Chemistry in the city: The scientific role of female societies in late eighteenth century. E. Serrano en *Ambix*, vol. 60, n.º 2, págs. 1-21, 2013.

por Sergi Cortiñas Rovira



Sergi Cortiñas Rovira es director del Observatorio de la Comunicación Científica de la Universidad Pompeu Fabra y coordinador del Grupo de Investigación en Comunicación Científica del mismo centro.

La pseudociencia en los medios

La ineficacia de los mecanismos de control hace que los mensajes sin rigor científico se cuelen en la televisión y confundan al público

«Oler el limón previene el cáncer.» Afirmaciones como esta abundan en la televisión pública y nada sucede. ¿A qué se deben este tipo de situaciones? En nuestro grupo de investigación nos hemos propuesto desentrañar algunos de los factores responsables de la proliferación de informaciones falsas en los medios de comunicación españoles.

En un estudio reciente, cuyos resultados se publicaron en diciembre del año pasado en la revista *Public Understanding of Science*, entrevistamos a 49 periodistas científicos de España con el propósito de conocer sus opiniones y actitudes. Se dibujan dos grupos bien diferenciados: el de los que muestran preocupación por el fenómeno y el de los que no. El primero lo integran profesionales muy sensibilizados y con posiciones críticas. Se sienten incomprendidos e indefensos, y censuran a sus propios medios porque estos no ponen más barreras a las pseudociencias. Los del segundo grupo, en cambio, no dan importancia a la cuestión ni muestran sensibilidad. Su diagnóstico es claro: el ciudadano ya sabe distinguir lo que es ciencia de lo que no. Argumentan también que para ellos las pseudociencias no existen, porque en su medio no tienen cabida —algo que no siempre es cierto.

Una denuncia habitual de los entrevistados es que los mecanismos de control en los medios de comunicación fallan estrepitosamente. Los libros de estilo apenas hablan de ello; los códigos deontológicos tampoco; los defensores del lector o del espectador suelen ser tibios, así como los responsables de los medios, que muestran escaso interés por el asunto. Las quejas acostumbran a encontrar una serie de respuestas más o menos típicas: «hemos incluido el tema para ser más plurales», «debemos respetar la libertad de expresión», «no podemos ser talibanes de la ciencia», «la realidad es más diversa de lo que los científicos creen». Ante este panorama, la pseudociencia se frota las manos. Incluso en los lugares más eruditos (universidades, editoriales), consigue abrirse paso para desesperación de la comunidad científica.



En Estados Unidos tampoco están a salvo. Se han extendido de manera preocupante los casos de sarampión, una enfermedad que estaba erradicada. Vuelve porque un grupo poderoso de anticientíficos cree que las vacunas son malas y grupos numerosos de padres han decidido no vacunar a sus hijos. Los medios tratan la cuestión con equidistancia (dan igualdad de tiempo a cada parte en conflicto) y la audiencia acaba dudando de todo.

Llevada al extremo, esa mala práctica periodística hace que el científico se sienta como un «florero». Así lo explicaba Carlos Elías, catedrático de periodismo científico de la Universidad Carlos III, en un estudio sobre el papel de los «invitados profesionales» y los expertos reales en la televisión basura española. Su trabajo recogía el testigo de un astrofísico al cual invitaron a un programa sobre vida extraterrestre. En el mismo plató, una visionaria sostenía que había vivido en Venus. El debate —o simulacro de debate— puso en igualdad de condiciones a la mujer en su delirio y al científico que le rebatía que la atmósfera de Venus es de ácido sulfúrico y allí no puede vivir nadie.

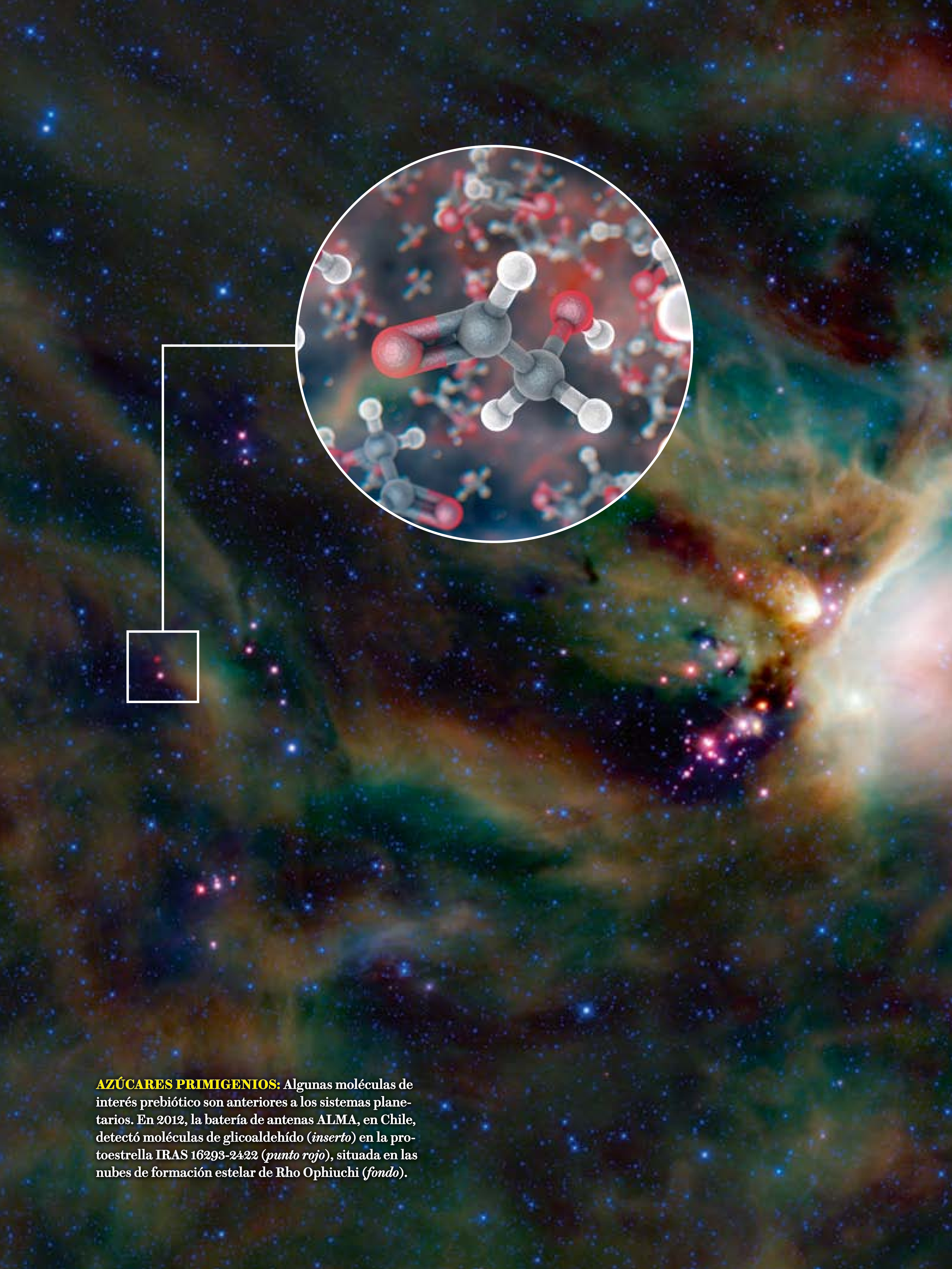
El público acaba quedándose con una versión distorsionada de la realidad, porque cree que las dos posiciones son igual de válidas, correctas o posibles, cuando no lo son. Y otra grave consecuencia: muchos científicos dejan de acudir a los medios porque sienten que solo les invitan para alimentar el espectáculo.

¿Cómo podría mejorarse la situación? Una tarea ineludible es la divulgación. Es necesario mejorar la cultura científica de los ciudadanos y motivar su capacidad crítica ante teorías, productos y técnicas de naturaleza pseudocientífica. Uno de los puntos fuertes de las falsas ciencias es precisamente nadar en un mar revuelto, donde lo verdadero y lo aparentemente verdadero acaban siendo lo mismo. La estrategia discursiva más habitual de los pseudocientíficos es disfrazar de jerga típica de científicos sus mensajes. Llegan así a un número muy alto de ciudadanos que, en muchos casos, son incapaces de discernir lo auténtico de lo falso.

Con el propósito de combatir esa desinformación, hemos desarrollado, con la ayuda de la FECYT, un espacio web con un catálogo de las principales pseudociencias (http://infopseudociencia.es). El objetivo del proyecto, liderado por Felipe Alonso y Marc Darriba, es explicar en qué consisten, por qué son pseudociencias y calibrar su peligrosidad. En suma, poner un poco de orden en un conjunto de conceptos cuyo estatus predilecto es precisamente el contrario: la indefinición, la ambigüedad y la confusión.

Y para terminar, una reflexión lingüística. Numerosos ciudadanos han tomado el término «pseudociencia» como sinónimo de «casi ciencia», cuando en realidad significa «falsa ciencia». ¿Por qué no hablar, pues, directamente de «falsa ciencia»? Ello dificultaría la vida a vendedores de humo y charlatanes de medio pelo que juegan con la salud de los ciudadanos desinformados o ingenuos.

THINKSTOCK/NIDWLW (*televisor*); THINKSTOCK/MAXSOMMA (*mago*)



AZÚCARES PRIMIGENIOS: Algunas moléculas de interés prebiótico son anteriores a los sistemas planetarios. En 2012, la batería de antenas ALMA, en Chile, detectó moléculas de glicoaldehído (*inserto*) en la protoestrella IRAS 16293-2422 (*punto rojo*), situada en las nubes de formación estelar de Rho Ophiuchi (*fondo*).

ASTRONOMÍA

El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida

Nuevas observaciones, modelos y experimentos de laboratorio comienzan a revelar nuestras raíces químicas en el cosmos

Rafael Bachiller

Rafael Bachiller es astrónomo y director del Observatorio Astronómico Nacional, perteneciente al Instituto Geográfico Nacional, en Madrid. Estudia las características del gas molecular en nebulosas planetarias y los procesos químicos en regiones de formación estelar, especialmente los desencadenados por los chorros protoestelares.



El Sol y su sistema planetario nacieron hace 4600 millones de años como consecuencia del colapso gravitatorio de una nube interestelar de gas y polvo. Hoy, nuestro planeta y otros cuerpos del sistema solar exhiben una riqueza química extraordinaria, con especies moleculares complejas que incluso han propiciado la aparición de vida en la Tierra. ¿De dónde surgió esa variedad molecular? ¿Es común en el universo, o constituye nuestro entorno cósmico más bien una excepción?

Aunque no podemos dar marcha atrás en el tiempo para observar la formación del Sol, desde hace unos años hemos comenzado a reconstruir su historia fisicoquímica por otros medios. La puesta en marcha de grandes observatorios infrarrojos, milimétricos y submilimétricos nos ha brindado la ocasión de analizar con un detalle sin precedentes numerosas protoestrellas y sistemas protoplanetarios de nuestra galaxia. Muchos de ellos se asemejan al sistema solar primitivo, por lo que nos ofrecen una instantánea del Sol y su entorno en distintos momentos de su pasado. Tomadas en conjunto, esas observaciones nos están permitiendo hilvanar la secuencia de procesos físicos y químicos que tuvieron lugar durante el nacimiento y la infancia del sistema solar.

La composición de las nubes interestelares distantes puede además cotejarse con la de los cometas y meteoritos de nuestro entorno, ya que estos conservan muchas de las propiedades químicas de la nebulosa presolar. Otra valiosa fuente de información procede del estudio de exoplanetas, cuyas características químicas, incluida la composición de algunas de sus atmósferas, ya han comenzado a medirse con cierto detalle.

Todas esas investigaciones no solo han demostrado que las nubes interestelares presentan una enorme diversidad de moléculas, sino que la complejidad química del medio aumenta progresivamente a medida que avanza el proceso de formación estelar. Hoy sabemos que los discos protoplanetarios contienen moléculas complejas en una variedad y abundancia suficientes para permitir la formación de aminoácidos, las piezas básicas de la vida. Poseen además grandes cantidades de agua; en algunos casos, la suficiente para dotar de ella a todos los cuerpos de un sistema planetario como el nuestro. Tenemos, pues, los ingredientes básicos para permitir la aparición de formas de vida simples en un medio acuoso. Si a ello sumamos la universalidad de los procesos químicos observados, la abundancia de planetas en la galaxia y la robustez de la vida, que en la Tierra se ha demostrado capaz de resistir enormes cataclismos, nos vemos conducidos a concluir que la vida debería constituir un fenómeno muy común en el cosmos.

REVOLUCIÓN ASTROQUÍMICA

Desde hace dos décadas estamos asistiendo a una auténtica revolución en astroquímica. En la frontera entre la astronomía, la física y la química, esta ciencia interdisciplinar ha revelado la existencia de más de 180 especies moleculares en el medio interestelar. De ellas, más de medio centenar contienen seis átomos o más, razón por la que los astrónomos las denominan «moléculas complejas». Lo que en un principio parecía un mero ejercicio de clasificación de moléculas por familias y número de átomos se ha convertido en una de las principales herramientas de diagnóstico fisicoquímico de nubes interestelares, protoestrellas, envolturas de estrellas evolucionadas y discos protoplanetarios. Apoyadas por simulaciones informáticas, experimentos de laboratorio y observaciones espectroscópicas, tales investigaciones nos han brindando una imagen cada vez más precisa de la evolución química del medio interestelar.

La molécula interestelar más abundante es la de hidrógeno (H_2), a la que sigue, en una proporción 10.000 veces menor, la de monóxido de carbono (CO). Otras especies significativas son

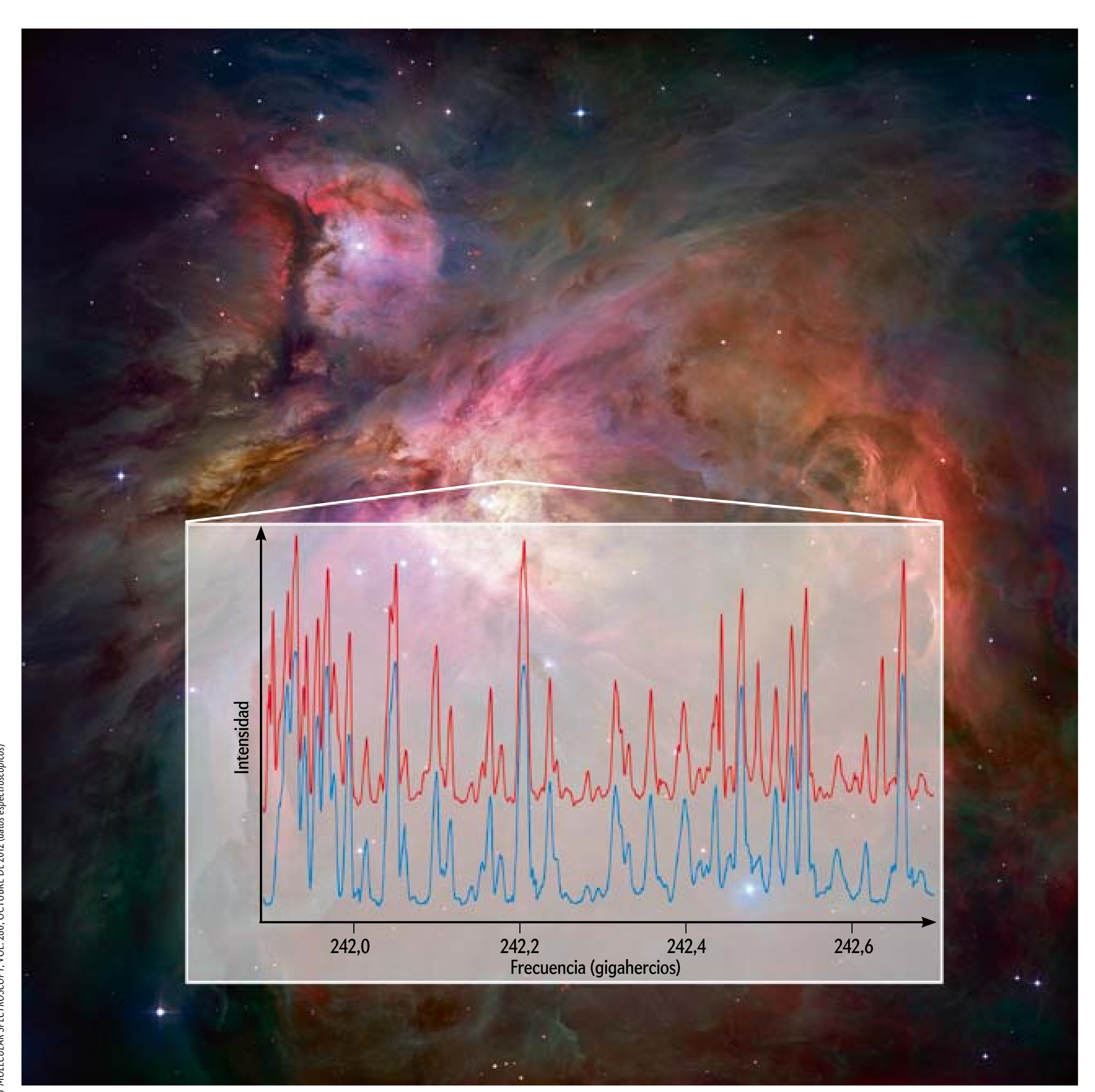
EN SÍNTESIS

Gracias a nuevos telescopios y experimentos de laboratorio, los astrónomos están comenzando a trazar los procesos químicos que median entre el colapso de las nubes interestelares y la formación de los sistemas planetarios.

En el medio interestelar se han detectado más de 180 especies moleculares, de las que medio centenar contienen 6 átomos o más. Esa riqueza química se incrementa aún más durante la formación de protoestrellas y discos protoplanetarios.

Varios estudios han revelado que las moléculas orgánicas complejas constituyen un ingrediente común en la gestación de los sistemas planetarios. Ello apunta a que la vida podría tener raíces interestelares y ser muy común en el universo.

PÁGINAS ANTERIORES: ALMA/ESO/NAOJ/NRAO Y L. CALÇADA/ESO *(moléculas)*; NASA/JPL-CALTECH/WISE *(Rho Ophiuchi)*



ALMA/NRAO/ESO NAOJ (*espectros*); HUBBLE/NASA/ESA (*nubes de Orión*); FUENTE: «AN ANALYSIS OF A PRELIMINARY ALMA ORION KL SPECTRUM VIA THE USE OF COMPLETE EXPERIMENTAL SPECTRA FROM THE LABORATORY», SARAH M. FORTMAN ET AL. EN *JOURNAL OF MOLECULAR SPECTROSCOPY*, VOL. 280, OCTUBRE DE 2012 (*datos espectroscópicos*)

HUELLA QUÍMICA: La comparación de los análisis espectroscópicos del medio interestelar con los espectros de moléculas conocidas ha permitido identificar numerosas especies químicas en el espacio. Estas líneas de emisión obtenidas por el telescopio ALMA (*rojo*) a partir de un estudio de la región de formación estelar de Orión (*fondo*) coinciden con el espectro del cianuro de etilo medido en el laboratorio (*azul*): una señal inequívoca de la presencia interestelar de esta molécula orgánica nitrogenada (CH_3CH_2CN).

el agua (H_2O), el amoníaco (NH_3), el formaldehído (H_2CO), el metanol (CH_3OH) e incluso algún azúcar simple, como el glicoaldehído ($HOCH_2CHO$).

Aunque el medio interestelar se encuentra muy diluido, las largas escalas de tiempo asociadas a los procesos astrofísicos permiten que numerosas reacciones químicas resulten efectivas y contribuyan a aumentar su riqueza molecular. La química interestelar suele desencadenarse con moléculas o átomos neutros, los cuales interaccionan con los iones que generan los rayos cósmicos y con la radiación ultravioleta ambiente. Aunque más lentos que las reacciones ion-molécula, algunos procesos entre especies neutras también revisten importancia. Los modelos numéricos de cinética química en fase gaseosa incluyen hoy más de 400 especies moleculares y miles de reacciones químicas diferentes. Según estas simulaciones, la inmensa mayoría de los átomos de carbono acaban formando parte de moléculas relativamente simples.

Además de gas, el medio interestelar contiene también pequeñas partículas de material sólido, o «polvo». Las nubes de gas y polvo representan en torno al 15 por ciento de la masa visible de la Vía Láctea, una proporción similar a la observada en la mayoría de las galaxias espirales. La interacción entre el

gas y el polvo desempeña una función clave en la formación y evolución temprana de todas las estrellas y planetas. En particular, varios estudios recientes han revelado que los procesos químicos que tienen lugar en la superficie de los granos de polvo contribuyen de manera fundamental a la evolución química del medio intersetelar.

Las partículas de polvo constan de un núcleo, formado por silicatos o compuestos carbonáceos como el grafito, el cual se encuentra rodeado por un manto helado. Este último es rico en moléculas simples, como hidrógeno, óxidos de carbono (CO, CO_2), agua, amoníaco, formaldehído, metanol y metano (CH_4). Los procesos químicos que acontecen en estos mantos helados están empezando a estudiarse en laboratorios terrestres. Para ello, se crean estructuras análogas a los granos de polvo interestelar y se someten a las condiciones típicas del medio, como bajas temperaturas e irradiación ultravioleta. Estos experimentos han revelado que la migración de moléculas simples en la superficie de los granos contribuye a formar especies cada vez más complejas en los revestimientos helados. Después, la radiación y las ondas de choque que se propagan por el medio eyectan esas especies y las incorporan al gas, lo que enriquece su química.

Pero no hay una única ruta para generar la química de interés prebiótico observada en las regiones protoestelares. Por ejemplo, el espacio interestelar es también rico en hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), macromoléculas que pueden llegar a contener hasta un centenar de átomos. En ocasiones, la radiación ultravioleta de las estrellas cercanas provoca la fotólisis de los HAP y los convierte en hidrocarburos más simples, como acetileno (C_2H_2) y metano, los cuales pueden dar lugar a otros derivados acetilénicos más complejos.

En última instancia, el origen de la complejidad molecular se encuentra en los procesos microscópicos que ocurren tanto en el gas como en el polvo interestelar. Por ello, además de los experimentos de química habituales, la astroquímica moderna se beneficia también de las oportunidades que ofrecen los aceleradores de partículas, como las fuentes de radiación de sincrotrón y de haces de iones. Estas grandes máquinas permiten simular, con una fidelidad sin precedentes, buena parte de los procesos microscópicos que tienen lugar en el medio interestelar. Todo ello está contribuyendo al desarrollo de una nueva subdisciplina que ha dado en llamarse «astrofísica de laboratorio».

A los experimentos y las simulaciones numéricas debemos sumar los progresos en espectroscopía. Las regiones de formación estelar se encuentran a temperaturas muy bajas, de entre 10 y 100 grados Kelvin (K), por lo que las colisiones entre moléculas solo excitan sus modos de rotación y de vibración. El espectro de rotación de las moléculas simples, como el monóxido de carbono, pertenece al dominio de las ondas milimétricas y submilimétricas (frecuencias comprendidas entre los 300 y los 3000 gigahercios), una región del espectro electromagnético que ha cobrado gran relevancia durante los últimos años.

Los avances teóricos y experimentales en espectroscopía molecular han posibilitado identificar sin ambigüedades numerosas especies en el medio interestelar. Las técnicas modernas de ondas submilimétricas permiten medir en el laboratorio los espectros moleculares en frecuencias de hasta 2000 gigahercios (GHz). José Cernicharo, del Centro de Astrobiología de Madrid, y sus colaboradores mantienen uno de los catálogos de datos espectroscópicos más detallados del mundo; un proyecto que ha conducido a sus autores a identificar multitud de nuevas moléculas en el espacio.

Por último, debemos señalar el enorme impacto que están teniendo en astroquímica los desarrollos en astronomía observacional. Hace poco, los grandes radiotelescopios del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM, una colaboración entre Francia, Alemania y España), en el granadino Pico Veleta y en el Plateau de Bure, en los Alpes franceses, fueron equipados con espectrógrafos de banda muy ancha para analizar intervalos de varios GHz en frecuencias del orden de los 100 GHz. En colaboración con Bertrand Lefloch, del Instituto de Planetología y Astrofísica de Grenoble, y un equipo internacional de astrónomos y químicos, el autor de este artículo ha emprendido recientemente el proyecto Muestreo Astroquímico en IRAM (ASAI, por sus siglas en inglés). Este persigue, a partir de un análisis de varias regiones de formación estelar en diferentes estadios de evolución, establecer un censo completo de todas las especies interestelares con una abundancia hasta 12 órdenes de magnitud menor que la del hidrógeno molecular.

Durante la última década, las observaciones terrestres se han visto complementadas con las proporcionadas por dos instrumentos espaciales dedicados en exclusiva a las ondas submilimétricas y al infrarrojo lejano: el telescopio Spitzer, de la NASA, y el observatorio Herschel, de la ESA. Finalmente, la puesta a punto en 2013 del gran interferómetro internacional ALMA, en el desierto chileno de Atacama, ha culminado una auténtica edad de oro en el estudio de las moléculas interestelares.

Gracias a ello, hoy resulta posible trazar la evolución de la complejidad química en las regiones de formación estelar, desde las zonas frías y densas que sucumben al colapso gravitatorio hasta las protoestrellas, los discos protoplanetarios y los sistemas planetarios. Aunque aún adolecen de grandes simplificaciones, estos estudios, entre los que se encuentra el proyecto ASAI, nos están ofreciendo una nueva e impactante visión sobre el origen astroquímico de la complejidad molecular terrestre y, en última instancia, sobre las raíces cósmicas de la vida.

NÚCLEOS PREESTELARES

Las nubes interestelares no son homogéneas. En su seno se observan regiones más compactas que, dependiendo de su densidad y temperatura, podrán colapsar y formar estrellas. Un buen ejemplo nos lo proporciona L1544, en las nubes de formación estelar de Tauro, a tan solo 500 años luz de distancia. Al igual que otras condensaciones preestelares de su clase, L1544 posee una zona central muy densa y fría, con cerca de un millón de moléculas de hidrógeno por centímetro cúbico y temperaturas inferiores a los 10 K.

Dicha región se encuentra rodeada por otra mucho menos densa. En ella opera la química «clásica» de las nubes interestelares oscuras, donde los rayos cósmicos ionizan parcialmente el gas y las reacciones ion-molécula dominan la química de las especies carbonadas. En particular, la ionización de moléculas de H_2 posibilita la reacción:

$$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H\,,$$

la cual da lugar al catión trihidrógeno (H_3^+), la semilla de toda la química ion-molécula y, probablemente, el ion más abundante y estable de las nubes interestelares. Al reaccionar con monóxido de carbono genera HCO^+ —una especie útil para el análisis del gas debido a su fuerte momento dipolar—, mientras que al hacerlo con oxígeno atómico produce OH^+. Este, en reacciones con H_2, genera otros cationes más complejos, como OH_2^+ y OH_3^+, los cuales siguen enriqueciendo el medio. Por otra parte, las reacciones entre especies neutras transforman el nitrógeno

atómico en molecular (N_2), lo que da lugar a amoníaco y al ión N_2H^+, muy empleados para determinar las propiedades físicas del gas.

Es muy posible que otras moléculas con oxígeno, como el metanol, necesiten para su formación una fuente de radiación ultravioleta que libere parte del material helado que rodea a los granos de polvo. Una vez en fase gaseosa, el metanol es muy activo. Su fotodisociación da lugar a radicales como CH_3 y CH_3O, los cuales pueden contribuir a formar moléculas orgánicas relativamente complejas, como el etanal (o acetaldehído, CH_3CHO), el acetonitrilo (o cianuro de metilo, CH_3CN) y la etenona (CH_2CO), todas ellas detectadas en condensaciones preestelares. Otras moléculas complejas, como las cadenas carbonadas de cianopoliinos ($HC_{2n+1}N$, con n entre 0 y 5) también han sido observadas en estas regiones.

De particular interés son los procesos químicos que tienen lugar en las zonas más densas de las condensaciones preestelares. Varias observaciones recientes han demostrado que en esas regiones, muy frías y protegidas de la radiación ultravioleta ambiente, la mayor parte de las moléculas se congelan y se adhieren a la superficie de los granos de polvo, un mecanismo conocido como depleción, o vaciado del gas. De esta manera, hasta el 90 por ciento del monóxido de carbono desaparece de la fase gaseosa y se integra en los mantos helados de los granos sólidos. Tal y como han demostrado las observaciones de Mario Tafalla, del Observatorio Astronómico Nacional, y sus colaboradores, muy pocas especies escapan a este fenómeno. En particular, la formación de amoníaco y N_2H^+ aumenta cuando las moléculas de CO desaparecen del gas, por lo que dichas especies constituyen excelentes trazadoras de las regiones más internas de las condensaciones preestelares.

Una reacción importante en dichas zonas es la que tiene lugar entre la molécula de hidrógeno deuterada (HD) y el catión H_3^+:

$$HD + H_3^+ \rightarrow H_2 + H_2D^+,$$

la cual desprende una energía equivalente a elevar la temperatura del medio hasta los 230 K, por lo que no es reversible en las gélidas áreas centrales de las condensaciones. Ello incrementa de manera muy notable la abundancia de H_2D^+, hasta el punto de que la razón H_2D^+/H_3^+ puede alcanzar valores muy superiores a la proporción D/H inicial. Además, el ion H_2D^+ constituye el punto de partida de un elevado número de reacciones que producen especies deuteradas, lo que deriva en una abundancia considerable de las correspondientes variantes del formaldehído (HDCO y D_2CO) y del metanol (CH_2DOH y otras). Dado que las bajas temperaturas provocan tanto el abandono de varias moléculas de la fase gaseosa como la deuteración de algunas especies, en las zonas más profundas y frías de las condensaciones preestelares coexisten ambos procesos. En lo que respecta al sistema solar, el estudio de las especies deuteradas ha permitido comparar la química actual con la primitiva.

En 2012, el observatorio Herschel detectó líneas espectrales de agua en las zonas más internas de L1544. El análisis de los datos, liderado por Paola Caselli, ahora en el Instituto Max Planck de Física Extraterrestre de Garching, demostró la existencia de una cantidad de vapor de agua equivalente a 2,6 veces la masa de Júpiter. Aunque cabe esperar que en estas regiones las moléculas de agua se encuentren en

Continúa en la página 52

Moléculas con hidrógeno

H_2	H_3^+	HD	H_2D^+
HD_2^+			

Moléculas con solo hidrógeno y carbono

C_2	C_3	C_5	CH^+
CH	C_2H	C_3H	C_4H
C_5H	C_6H	C_7H	C_8H
CH_3C_2H	CH_3C_4H	CH_2	CH_4
C_2H_2	C_2H_4	$[C_3H_2]$	H_2C_3
H_2C_4	$[C_3H]$	H_2C_6	C_3H_6
$[C_6H_6]$	CH_3	HC_4H	HC_6H
CH_3C_6H	C_6H^-	C_4H^-	C_8H^-
C_3H^+ ?	$C_{14}H_{10}^+$?		

Moléculas con oxígeno, hidrógeno y/o carbono

CO	CO^+	C_3O	C_2O
O_2	OH	H_2O	H_3O^+
HCO	HCO^+	HOC^+	$HOCO^+$
H_2CO	CH_3OH	CH_3CHO	CH_3COOH
CH_3OCH_3	$HCOOCH_3$	HC_2CHO	CH_3CH_2OH
HCOOH	$(CH_3)_2CO$	H_2C_2O	CO_2
H_2COH^+	$[C_2H_4O]$	CH_2OHCHO	H_2CCHOH
CH_3CH_2CHO	CH_2CHCHO ?	$(CH_2OH)_2$	$[H_2C_3O]$
$C_2H_5OCH_3$?	C_2H_5OCHO	CH_3OCOCH_3	CH_3O
OH^+	H_2O^+	HO_2	H_2O_2

Moléculas con nitrógeno, hidrógeno y/o carbono

CN	C_3N	HC_3NH^+	HCCN
HCN	HC_3N	HC_2NC	HNC_3
HC_5N	HC_7N	HC_9N	$HC_{11}N$
HNC	H_2CN	NH	NH_3
N_2H^+	CH_3CN	CH_3NC	CH_3C_5N
$HCNH^+$	NH_2CN	CH_2CN	CH_2NH
CH_3NH_2	CH_3CH_2CN	CH_2CHCN	CH_3C_3N
NH_2	C_5N	HC_4N	CH_2CCHCN
H_2CCNH ?	H_2CCN	H_2NCH_2CN	C_3N^-
C_5N^-	HNCNH	HNCHCN	CH_3CHNH
CN^-	NH_4^+	C_3H_7CN	C_2N

Moléculas con nitrógeno y oxígeno

NO	N_2O	HNO	HNCO
NH_2CHO	CH_3CONH_2	HCNO	HOCN
HCOCN	H_2NCO^+ ?	NO^+ ?	

Moléculas con azufre, silicio o fósforo

SO	SO_2	NS	H_2S
OCS	HCS^+	CS	C_2S
C_3S	SO^+	H_2CS	HNCS
CH_3SH	PN	CP	SiC
SiO	$[SiC_2]$	SiS	SiN
SiH_4	SiC_4	SH	SiCN
$[SIC_3]$	SIH ?	PO	HCP
SiNC	CCP	HSCN	PH_3 ?
SH^+	CH_3CH_2SH ?		

Moléculas «metálicas»

HCl	NaCl	KCl	AlCl
AlF	NaCN	MgNC	MgCN
HF	FeO ?	CF^+	AlNC
AlO	AlOH	HCl^+	H_2Cl^+
TiO	KCN	FeCN	TiO_2
HMgNC	ArH^+		

Fullerenos

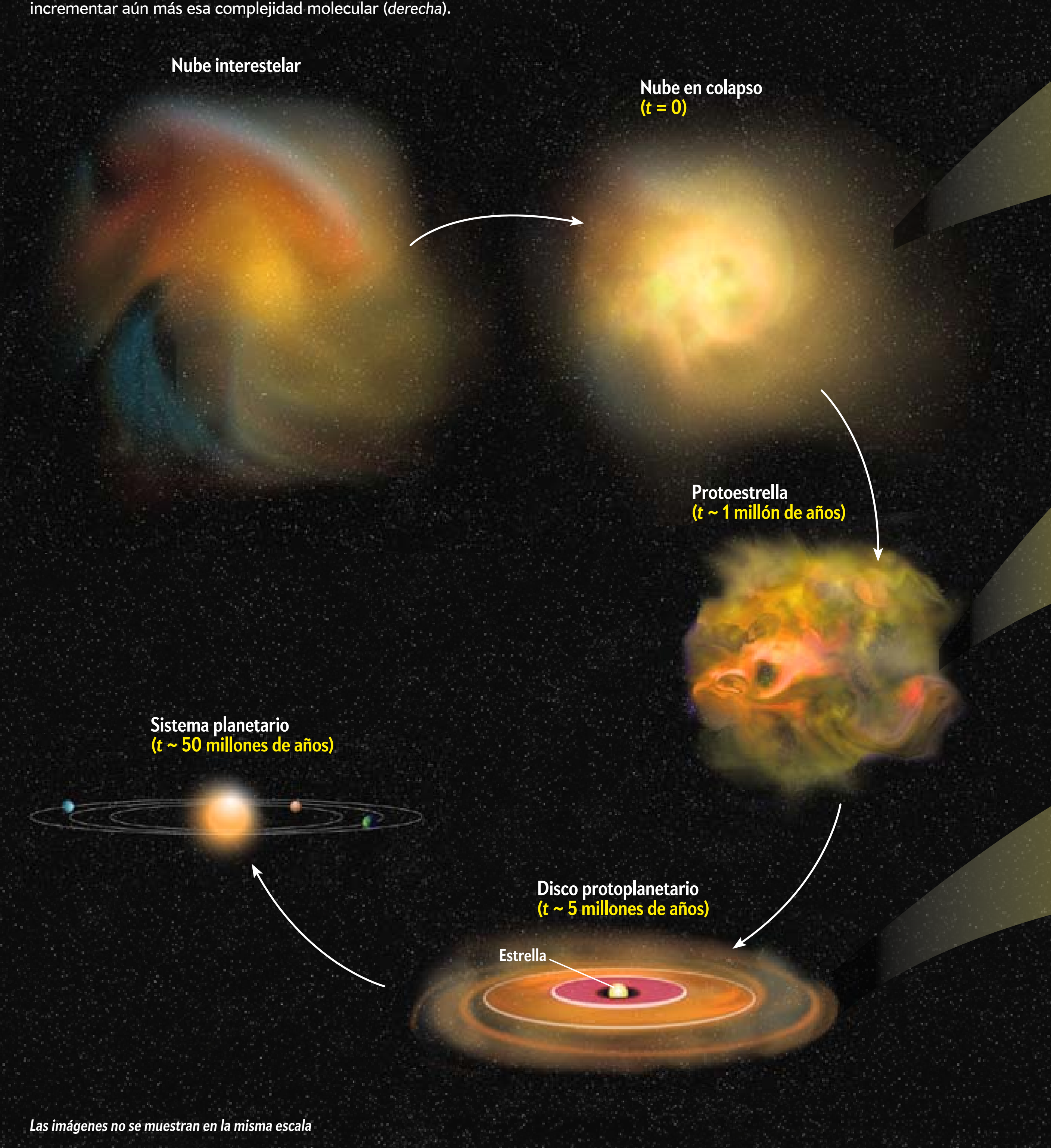
C_{60}	C_{70}	C_{60}^+

RIQUEZA CÓSMICA: El gas interestelar y circunestelar presenta una sorprendente diversidad química. Esta tabla, actualizada a fecha de septiembre de 2014, contiene 193 especies. De las numerosas variedades isotópicas detectadas solo se indican las correspondientes a las moléculas de hidrógeno. Las especies que figuran entre corchetes son cíclicas; las marcadas con un signo de interrogación solo han sido detectadas de manera tentativa.

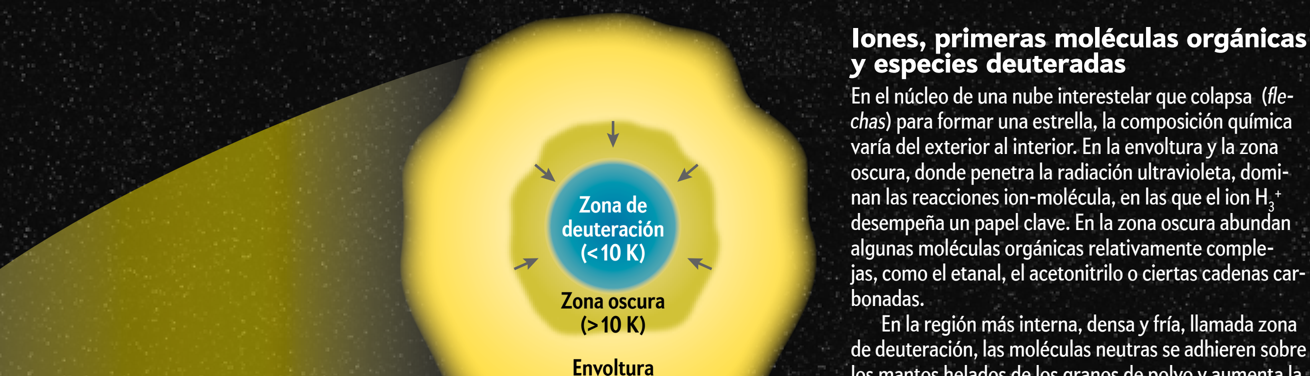
FUENTE: OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL/INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

La evolución química del medio interestelar

Las estrellas y los sistemas planetarios nacen a partir del colapso gravitatorio de las nubes interestelares de gas y polvo (*abajo*). Aunque la molécula más abundante en el medio interestelar es la de hidrógeno, este contiene también trazas de otras muchas especies; entre ellas, monóxido de carbono, agua y amoníaco, así como algunas moléculas orgánicas simples, como formaldehído o metanol. Los distintos procesos físicos y químicos que tienen lugar durante la formación de un sistema planetario contribuyen a incrementar aún más esa complejidad molecular (*derecha*).



Las imágenes no se muestran en la misma escala



Iones, primeras moléculas orgánicas y especies deuteradas

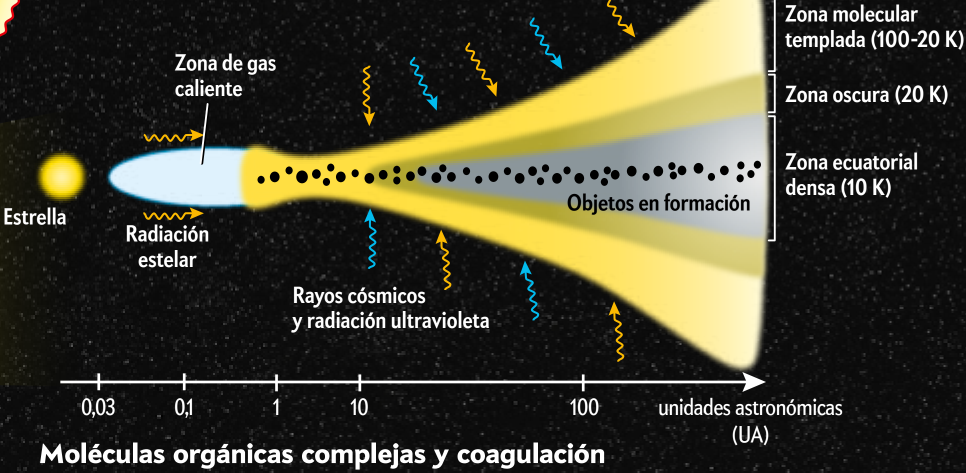
En el núcleo de una nube interestelar que colapsa (*flechas*) para formar una estrella, la composición química varía del exterior al interior. En la envoltura y la zona oscura, donde penetra la radiación ultravioleta, dominan las reacciones ion-molécula, en las que el ion H_3^+ desempeña un papel clave. En la zona oscura abundan algunas moléculas orgánicas relativamente complejas, como el etanal, el acetonitrilo o ciertas cadenas carbonadas.

En la región más interna, densa y fría, llamada zona de deuteración, las moléculas neutras se adhieren sobre los mantos helados de los granos de polvo y aumenta la abundancia de especies deuteradas. En el sistema solar, el estudio de estas especies ha permitido relacionar su composición química actual con la primitiva.

Agua y óxido de silicio

El nacimiento de una protoestrella eleva de manera considerable la temperatura del medio y provoca la eyección de chorros de materia, lo que desencadena nuevos procesos químicos. La envoltura y la zona oscura conservan la composición del núcleo denso preestelar. Sin embargo, los chorros supersónicos eyectados desde la región central crean ondas de choque que destruyen los granos de polvo que encuentran a su paso, un proceso que genera grandes cantidades de agua y óxido de silicio.

Las ondas de choque también aumentan la abundancia de algunas especies orgánicas simples, como formaldehído y metanol, e inducen la creación de otras más complejas, como formiato de metilo o etanol, entre otras.

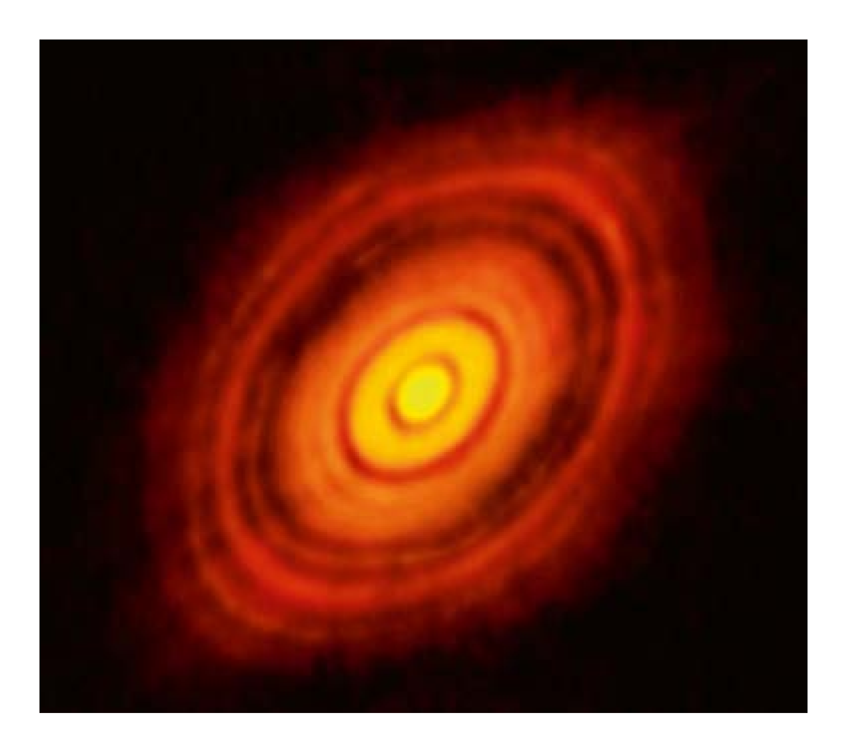


Moléculas orgánicas complejas y coagulación

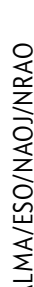
La estructura transversal de un disco protoplanetario presenta varios estratos. En la zona de fotodisociación, la más externa, la radiación ultravioleta ioniza el gas y domina la fotólisis de la mayor parte de las moléculas. En la región molecular templada abundan los radicales y los iones, mientras que la zona oscura se encuentra dominada por la química ion-molécula habitual en el medio interestelar.

En el estrato ecuatorial del disco, las moléculas neutras se adhieren sobre los mantos helados de los granos de polvo, donde se sintetizarán numerosas moléculas orgánicas complejas. La coagulación entre granos conduce a la formación de objetos de tamaño creciente: rocas, cometas, planetesimales y planetas. En las condritas del sistema solar (vestigios del sistema planetario primitivo) se han detectado más de seiscientas moléculas orgánicas complejas; entre ellas, varios aminoácidos.

BILL SAXTON/NRAO/AUI/NSF (*formación de un sistema planetario*); *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA* SEGÚN F. MARTÍN Y R. BACHILLER/OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL (*fases y procesos químicos*)



NACIMIENTO DE UN SISTEMA PLANETARIO: Esta espectacular imagen de la estrella HL Tauri y su entorno fue tomada el año pasado por el interferómetro ALMA gracias a la emisión del polvo en longitudes de onda milimétricas. La estrella se encuentra rodeada por un disco protoplanetario de gas y polvo con una rica estructura. Los huecos anulares corresponden a las regiones que han sido despejadas de material debido a la formación de planetas.



Viene de la página 49
los mantos helados de los granos de polvo, las mediciones del observatorio Herschel sugieren que cierta cantidad de radiación en el ultravioleta lejano (posiblemente producida por el impacto de los rayos cósmicos) puede penetrar incluso en las regiones más profundas de la nube. Como consecuencia, una fracción de las moléculas de agua pasaría del hielo a la fase gaseosa.

PROTOESTRELLAS

Una vez que la condensación preestelar sucumbe a su propio peso y nace una protoestrella, la radiación comienza a iluminar la zona más interna del objeto, donde la densidad supera el millón de moléculas de H_2 por centímetro cúbico. La temperatura de la región central sobrepasa los 100 K y la radiación sublima los estratos de hielo de los granos de polvo. Este proceso eyecta de la fase sólida numerosas especies moleculares (agua, amoníaco, metanol, etcétera) y las introduce en el gas, lo que enriquece notablemente su química.

Mediante reacciones con el ion H_3^+, las moléculas de agua y metanol de la fase gaseosa pueden formar éter dimetílico (CH_3OCH_3) en apenas 100.000 años. Aunque esta química de «núcleo caliente» (*hot core*) se venía observando desde hacía tiempo en las regiones de formación de estrellas masivas, hace unos años que Cecilia Cecarelli, del Instituto de Planetología y Astrofísica de Grenoble, y sus colaboradores la detectaron en zonas de gestación de estrellas de tipo solar. Por analogía a las anteriores, estas han recibido el nombre de *hot corinos*, que podría traducirse como «pequeños núcleos calientes».

En el entorno de estos núcleos la temperatura decrece con rapidez. Allí donde baja de los 20 K, los mecanismos de depleción molecular operan de manera similar a como lo hacen en las condensaciones preestelares. Sin embargo, en las zonas «templadas», con temperaturas comprendidas entre 25 y 100 K, parece tener gran importancia la sublimación del metano. Cuando este alcanza una abundancia suficiente en la fase gaseosa, reacciona con iones C^+ y se inicia la formación de cadenas carbonadas. Ello explica la peculiar composición de ciertas regiones identificadas hace poco en torno a algunas protoestrellas, las cuales han recibido el nombre de protoestrellas de tipo WCCC, siglas inglesas de «química templada de cadenas de carbono». De ellas, el mejor ejemplo nos lo proporciona L1527, situada también en las nubes de Tauro.

Durante la formación de una estrella, los fenómenos de acreción gravitatoria se ven acompañados por la eyección de violentos chorros de materia surgidos desde la interfaz que separa la protoestrella del disco protoplanetario. Tales chorros son bipolares; es decir, se componen de dos haces que se propagan desde los polos en sentidos opuestos. Al surcar el medio circundante, ese flujo de materia, muy supersónico, produce ondas de choque (análogas a las que genera un avión en el aire). Estas comprimen y calientan el gas y el polvo ambientes, lo que da lugar a nuevos procesos químicos.

Entre otros fenómenos, las ondas de choque permiten que tengan lugar algunas reacciones con barreras de activación considerables. También eyectan moléculas de los mantos helados del polvo, mientras que las más energéticas pueden llegar incluso a romper el núcleo de los granos. En ambos casos, buena parte del material sólido se incorpora a la fase gaseosa, lo que vuelve a alterar su composición.

Varios estudios llevados a cabo por el autor de este artículo junto con Claudio Codella, del Observatorio de Arcetri, y otros colaboradores han demostrado que numerosas moléculas poco abundantes en el medio interestelar denso comienzan a proliferar tras el impacto de una onda de choque. El caso más espectacular corresponde al monóxido de silicio (SiO), cuya abundancia se incrementa en varios órdenes de magnitud. También aumentan su presencia el formaldehído, el metanol e incluso algunas moléculas orgánicas complejas.

El año pasado detectamos especies como formiato de metilo ($HCOOCH_3$), etanol (CH_3CH_2OH), ácido fórmico (HCOOH) y acetonitrilo, todas ellas consideradas trazadoras de núcleos calientes, en una de las regiones de choque de la protoestrella L1157-mm, situada a unos 800 años luz de la Tierra. El flujo protoestelar de este objeto constituye el mejor ejemplo de los llamados «químicamente activos»; es decir, aquellos en los que las ondas de choque parecen tener la energía óptima para enriquecer notablemente la química. Dado que las escalas de tiempo asociadas a estas ondas resultan demasiado cortas para permitir que la química del gas evolucione por sí sola, cabe pensar que todas estas moléculas han sido eyectadas desde los granos de polvo.

Los modelos teóricos predicen que el vapor de agua debería abundar en las regiones sometidas al paso de las ondas de choque protoestelares, ya que tanto la evaporación directa desde los mantos helados del polvo como una serie de reacciones con

fuertes barreras de activación (entre H_2 + O y H_2 + OH) conducen a la formación de agua. Su presencia en estas zonas ha sido confirmada por investigadores del Observatorio Astronómico Nacional como parte del proyecto Agua en las Regiones de Formación Estelar con Herschel (WISH, por sus siglas en inglés), liderado por Ewine van Dishoeck, del Observatorio de Leiden. Sin embargo, las abundancias encontradas, del orden de 10^{-6}, resultan unos dos órdenes de magnitud inferiores a las predichas (si bien en las regiones más calientes las observaciones concuerdan mejor con los modelos). En estos momentos, los datos del observatorio espacial Herschel siguen analizándose para obtener una imagen más clara de estos procesos.

DISCOS PROTOPLANETARIOS

Debido a la conservación del momento angular, a medida que la nube se contrae, su zona central comienza a rotar cada vez más rápido. Cuando se ha formado la protoestrella, se crea a su alrededor un disco rotante de gas y polvo a partir del cual se formarán los planetas. Desde hace unos años, un número creciente de observaciones parecen indicar que prácticamente todas las estrellas de la galaxia se encuentran rodeadas por un sistema planetario.

Resulta muy difícil observar un disco protoplanetario en sus fases iniciales, ya que este se confunde con la protoestrella, que aún acreta materia, y con el flujo bipolar que emerge a velocidades supersónicas. La compleja combinación de los movimientos de acreción, eyección y rotación no permite distinguir con claridad las diferentes componentes protoestelares, menos aún si tenemos en cuenta que todo el sistema se encuentra sumido en las profundidades de una nube polvorienta.

Sin embargo, a medida que avanza el proceso de formación, los vientos y la radiación protoestelares despejan el entorno. Transcurrido un tiempo inferior a un millón de años, el disco se hará observable, en particular gracias a la difusión de la luz óptica e infrarroja emitida por la nueva estrella. Gracias a ello se han detectado numerosos discos protoplanetarios en torno a estrellas de tipo T Tauri (jóvenes y de poca masa) y de tipo Ae de Herbig (de masa intermedia). Tales discos son pequeños, ligeros y fríos. Su masa suele rondar la centésima parte de la masa de la estrella, y su temperatura se halla entre 10 y 200 K. Constituyen, pues, emisores muy débiles, por lo que resulta difícil estudiar con detalle incluso los más cercanos, situados a distancias de unos 500 años luz.

A pesar de todo, varias observaciones recientes, interpretadas con la ayuda de modelos teóricos, han revelado parcialmente la estructura de estos discos. Se ha visto que incluyen una pequeña zona caliente central, muy próxima a la protoestrella, donde la temperatura puede alcanzar varios centenares de grados. Dicha región contiene moléculas simples; entre ellas, H_2, CO, OH y H_2O, identificables a partir de sus líneas espectrales de vibración y rotación en el infrarrojo cercano y medio. Tanto en la zona central como en otras áreas templadas del disco, donde penetra la radiación ultravioleta, los HAP pueden degradarse por fotólisis y formar pequeños hidrocarburos, como acetileno y metano. Después, debido a la turbulencia del entorno, estas especies se difunden por el disco y contribuyen así a la química en otras zonas.

En lo que respecta a su estructura transversal, un disco protoplanetario comprende cuatro estratos principales. El más externo (tanto por encima como por debajo del disco) se halla sometido al efecto de la radiación ultravioleta estelar y ambiente. Forma una especie de atmósfera tenue cuya química queda dominada por la fotoionización y fotodisociación moleculares. En ella, las líneas espectrales «prohibidas» del oxígeno neutro y el carbono ionizado constituyen los mejores elementos de diagnóstico. Bajo esa atmósfera de fotodisociación se extiende una capa templada, con temperaturas superiores a 20 K. Dominada por radicales e iones, la fotoquímica aún desempeña allí un papel relevante. Más hacia el interior se encuentra un estrato oscuro y frío, caracterizado por los procesos ión-molécula habituales del medio interestelar. En él, la adsorción de especies sobre los granos de polvo comienza a cobrar relevancia y las moléculas más abundantes son CO, HCO^+, HCN y CS.

Por último, en el plano ecuatorial del disco, bien protegido de la radiación ultravioleta, la mayoría de las moléculas se encuentran adheridas al hielo de los granos de polvo. En la fase gaseosa solo sobreviven especies simples, como N_2H^+, NH_3 y, por supuesto, el catión H_3^+. Sin embargo, la fase helada contiene grandes cantidades de agua y material orgánico simple. En esta región de alta densidad, el polvo evoluciona formando moléculas orgánicas cada vez más complejas sobre los mantos helados. Al mismo tiempo, el hielo facilita la coagulación entre granos para dar lugar a cuerpos sólidos progresivamente mayores y más densos: rocas, cometas, planetesimales y, por último, los planetas y sus lunas.

ANTECEDENTES QUÍMICOS DE LOS PLANETAS

Los planetas del sistema solar contienen hoy una enorme riqueza molecular. Esta se debe al reprocesado del material sólido que tuvo lugar durante su formación, así como a la influencia de los rayos cósmicos, el viento solar y la radiación ultravioleta ambiente. Por tanto, no resulta nada sencillo reconstruir la historia química de su formación.

Sin embargo, otros objetos no planetarios, como los cometas y las condritas carbonáceas, constituyen residuos relativamente inalterados de las etapas iniciales del sistema solar. Las observaciones espectroscópicas de varios cometas han revelado que estos cuerpos presentan, en esencia, la misma variedad molecular que las protoestrellas de tipo solar. Aunque se observan algunas variaciones entre los diferentes cometas, la mayoría de las especies identificadas proceden directamente de la sublimación de los mantos helados de los granos de polvo. Las abundancias moleculares halladas en el cometa Hale-Bopp, el mejor estudiado hasta la fecha, guardan una clara correlación con las observadas en protoestrellas distantes. Ello demuestra que, cuando menos, algunos de los hielos volátiles de la nebulosa presolar se incorporaron sin grandes alteraciones en ciertos objetos del sistema solar.

En la última década, las sondas espaciales *Stardust*, de la NASA, y *Hayabusa*, de la Agencia Espacial Japonesa, han traído a la Tierra muestras del cometa Wild 2 y del asteroide Itokawa, respectivamente. Compuestas por unos pocos granos de polvo (un millón de Wild 2 y en torno a un millar de Itokawa), estos dos pequeños tesoros siguen siendo objeto de cuidadosos análisis. La muestra de Wild 2 presenta una distribución de abundancias y composiciones relativamente heterogénea entre sus partículas, con numerosas moléculas orgánicas complejas y pequeños hidrocarburos policíclicos.

Tanto Wild 2 como Itokawa exhiben una composición química muy similar a la observada en las condritas, meteoroides rocosos (con poco contenido metálico) que no han sufrido procesos de fusión y que, por tanto, reflejan con fidelidad la composición inicial del disco protoplanetario. De ellas, las condritas carbo-

náceas se caracterizan por su elevado contenido en compuestos de carbono. Presentan también una abundancia significativa de sustancias volátiles y agua, lo que sugiere un origen muy alejado del Sol. Sin embargo, el aspecto más fascinante de estas rocas reside en su enorme variedad de compuestos orgánicos. Hasta ahora se han identificado en ellas más de seiscientas moléculas orgánicas complejas, como hidrocarburos, alcoholes, cetonas, aldehídos, aminas y muchas otras, entre las que cabe destacar varios aminoácidos, como la glicina y la alanina.

Hoy por hoy no resulta posible explicar el origen de la complejidad molecular de las condritas. En comparación, las moléculas orgánicas observadas en las regiones de formación estelar resultan relativamente simples. A pesar de los numerosos intentos al respecto, ni siquiera la glicina ha sido identificada en el medio interestelar. ¿Tal vez las moléculas más simples de las regiones de formación estelar sirven como piezas básicas en la construcción de aminoácidos y otras grandes moléculas presentes en los meteoritos carbonáceos? No obstante, tampoco debemos olvidar que el medio interestelar contiene HAP y, quizás, algunos fullerenos y grafenos, lo que abre la puerta a que parte de las moléculas complejas de las condritas se formasen a partir de la fragmentación de aquellos por fotólisis. Lo que sí parece muy plausible es que la coagulación de los granos de polvo para formar rocas y planetesimales contribuyese a elevar el nivel de complejidad molecular en los estadios iniciales de formación del sistema solar.

Al menos en principio, el agua de los océanos terrestres podría ofrecernos alguna pista sobre la composición de la nebulosa presolar. Los océanos representan unas dos diezmilésimas partes de la masa de la Tierra, una cantidad en torno a un millón de veces menor que la observada en los discos protoplanetarios típicos, donde la mayor parte del agua se encuentra en los mantos helados del polvo. Así pues, nuestro disco protoplanetario habría contenido agua en abundancia para dotar de ella a todos los cuerpos del sistema solar.

Sin embargo, el agua observada en las protoestrellas presenta un grado de deuteración muy distinto del de los océanos terrestres. Mientras que en las primeras la razón HDO/H_2O asciende a 0,1, en nuestro planeta el mismo cociente ronda el valor de 0,000156. En la mayor parte de los cometas estudiados hasta ahora, la deuteración resulta entre dos y tres veces mayor que en la Tierra. El valor más alto, 0,00053, fue medido a finales del año pasado por la sonda *Rosetta* en el cometa 67P/Churymov-Gerasimenko [*véase* «Con los pies sobre nuestro pasado», por Josep M. Trigo; Investigación y Ciencia, enero de 2015]. No obstante, los estudios llevados a cabo en otros asteroides y en los cometas 103P/Hartley 2, C/2009 P1 Garradd y 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková han arrojado valores muy similares a los terrestres. Por tanto, puede que el agua de nuestro planeta, el de los asteroides y el de algunos cometas tuviese un origen común. Ello sugiere que el disolvente universal tal vez llegase a la Tierra a bordo de asteroides o cometas poco después de la formación del sistema solar.

En todo caso, las grandes diferencias en la razón HDO/H_2O medida en las protoestrellas y en los objetos actuales del sistema solar parecen indicarnos que el agua protosolar no acabó directamente en la Tierra, los asteroides y los cometas. Quizá las moléculas iniciales de agua fuesen destruidas para volver a sintetizarse en estadios posteriores. O tal vez tuviese lugar algún proceso de segregación isotópica o de mezclado aún desconocido. En cualquier caso, serán necesarias más observaciones para extraer conclusiones definitivas.

¿TIENE LA VIDA RAÍCES INTERESTELARES?

En la composición química de los objetos actuales del sistema solar, incluido su material biológico, está escrita la historia de su formación. ¿Seremos algún día capaces de leerla? El rico inventario de moléculas orgánicas encontradas en las regiones de formación estelar, los cometas, las condritas carbonáceas y otros cuerpos sugiere persuasivamente que la vida tiene raíces interestelares. Sin embargo, su complejidad esconde y enmaraña ese legado puramente interestelar.

No sabemos aún cómo se aportó el carbono a los planetas para que surgiese la vida. Tal vez los aminoácidos, los azucares y los ácidos grasos se formasen en el disco protoplanetario y, desde allí, se incorporasen directamente a los planetas. Sin embargo, tampoco podemos descartar que en los discos solo se sinteticen moléculas más simples y que, a partir de ellas, se creen otras más complejas durante el proceso de formación de planetesimales, cometas, planetas y satélites. Sea como fuere, en los discos protoplanetarios abundan, además del agua, numerosas moléculas orgánicas relativamente complejas. Un requisito básico para permitir la síntesis de aminoácidos y, con ello, la aparición de formas de vida simples en un medio acuoso.

Si bien puede verse como una consecuencia de la universalidad de las leyes de la física, resulta reconfortante ver cómo, en un contexto astronómico, todos los procesos observados tanto en la Vía Láctea como en otras galaxias apuntan también a la universalidad de la química. Hoy sabemos que casi todas las estrellas se encuentran acompañadas por sistemas planetarios. Y que, al menos en una galaxia media como la nuestra, los planetas tal vez sean más numerosos que las estrellas. Al observar en una pequeña región del cielo en la constelación del Cisne, el telescopio espacial Kepler, de la NASA, ha encontrado decenas de planetas en la zona de habitabilidad de sus respectivas estrellas. Se estima que, tan solo en la Vía Láctea, podría haber unos 9000 millones de planetas similares a la Tierra y potencialmente habitables. No insistiremos aquí en la robustez y adaptabilidad de algunos seres vivos, que en la Tierra han sobrevivido a glaciaciones, impactos catastróficos de meteoritos y condiciones extremas de temperatura, densidad u hostilidad química.

Al considerar la universalidad de la química, la abundancia de planetas potencialmente habitables y la robustez de la vida, nos vemos conducidos a pensar que la vida debe constituir un fenómeno generalizado en el universo.

PARA SABER MÁS

Molecular outflows: Observations. Rafael Bachiller en *Protostellar Jets in Context*, dirigido por K. Tsinganos, T. Ray y M. Stute. Springer, 2009.
Complex organic interstellar molecules. Eric Herbst y Ewine F. van Dishoeck en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 47, septiembre de 2009.
The molecular universe. Dirigido por José Cernicharo y Rafael Bachiller. Cambridge University Press, 2012.
Our astrochemical heritage. Paola Caselli y Cecilia Ceccarelli en *The Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 20, n.º 1, octubre de 2012.
Fast molecular jet from L1157-mm. Mario Tafalla et al. en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 573, enero de 2015. Disponible en **www.aanda.org/articles/aa/full_html/2015/01/aa25255-14/aa25255-14.html**
Página web del proyecto ASAI: **www.oan.es/asai**

EN NUESTRO ARCHIVO

Protoestrellas. Rafael Bachiller en *IyC*, septiembre de 1998.
El universo invisible de Herschel. Paolo Saraceno en *IyC*, febrero de 2013.
Meteoritos primitivos. Alan E. Rubin en *IyC*, abril de 2013.

LA HISTORIA DE UN DIOS MAYA

El descubrimiento de una obra de arte en la antigua ciudad maya de Holmul ilumina una vieja polémica

Zach Zorich

El rey había estado sumido en la oscuridad durante más de 1400 años. Cuando los arqueólogos lo encontraron, le faltaba la mitad del rostro, finamente tallado, pero el tocado y las insignias se conservaban íntegros. Dirigía su único ojo hacia el sombrío túnel que los visitantes habían excavado en uno de los mayores monumentos de la antigua ciudad maya de Holmul, en el noreste de la actual Guatemala. Los jeroglíficos revelaron su nombre: Och Chan Yopaat, «el dios de la tormenta entra en el cielo».

El rey es la figura central de un conjunto escultórico recién descubierto y que tiene en vilo a los estudiosos de la civilización maya. Francisco Estrada-Belli, de la Universidad de Boston, había estado excavando el monumento (una pirámide rectangular de techo plano donde se realizaban ceremonias) para obtener información sobre el sistema político durante un período especialmente tumultuoso de la historia maya. En el interior de la pirámide se encontraban los restos de otros edificios, levantados siglos



UN IMPRESIONANTE FRISO desenterrado en la antigua ciudad de Holmul, en Guatemala, está permitiendo descifrar la historia de las sociedades mayas durante una larga guerra que duró más de mil años.

AP PHOTO



EN SÍNTESIS

La excavación de un enorme friso tallado en la antigua ciudad de Holmul, en Guatemala, está ayudando a esclarecer un capítulo clave de la historia maya.

Se cree que en el friso está representado el fundador de la dinastía que gobernó Holmul, situada en el centro de dos grandes reinos mayas rivales.

Rica en símbolos e inscripciones, la obra de arte esconde gran cantidad de información sobre las relaciones de vasallaje entre los gobernantes de la región.

antes en el mismo lugar y sobre los que más tarde se construyeron templos de mayor tamaño. Cuando Estrada-Belli y su equipo estaban abriendo un túnel a través de las estructuras anidadas para averiguar lo que quedaba de ellas, se toparon con la base de una escalinata. En el verano de 2013, las escaleras les llevaron hasta la fachada de un templo de unos diez metros de alto que, por algún motivo, se había salvado de la demolición. Un magnífico friso, un intrincado relieve de estuco de ocho metros de largo por dos de ancho, decoraba la parte superior del templo.

Pero el valor del friso va mucho más allá de lo artístico. Constituye un documento histórico para quienes intentan desentrañar cómo funcionaron las sociedades mayas durante una época convulsa. Cuando se construyó, hacia el año 590 de nuestra era, Holmul se encontraba en medio de un conflicto que, según numerosos especialistas, definió la historia maya durante más de un milenio: la guerra entre los reinos de Tikal y Kaanul. Los expertos creen que el rey representado en el friso fue el fundador de la dinastía que gobernó Holmul durante aquella época. Si están en lo cierto, el hallazgo podría ayudar a responder antiguos interrogantes sobre la gobernanza maya.

ESCRITO EN ESTUCO

Aunque el motivo de una guerra tan duradera ha caído en el olvido, varios expertos piensan que se encontraba relacionado con el acceso a los bienes. Lo más probable es que los gobernantes de Tikal y Kaanul lucharan por el control de las rutas comerciales para conseguir artículos como obsidiana, para la fabricación de herramientas y armas; jade, para la elaboración de objetos sagrados; o granos de cacao, que servían tanto de moneda como de ingrediente principal de una bebida de chocolate que se consumía durante los rituales religiosos. Holmul probablemente formaba parte de una red de decenas o centenas de ciudades unidas por relaciones comerciales, las cuales canalizaban la prosperidad económica de la región hacia la capital del reino con el que estuvieran aliadas en ese momento. Sin embargo, su importancia para los arqueólogos no ha dejado de aumentar gracias a la gran cantidad de información preservada en sus ruinas, que ilustran tanto el pasado del lugar como la política de la época.

Aunque el templo y su espectacular friso siguen siendo objeto de análisis, Estrada-Belli y sus colaboradores ya han comenzado a desenmarañar la información que esconde sobre una época clave. Los gobernantes mayas utilizaban su gran acumulación de riquezas para, entre otras cosas, erigir monumentos con los que complacer a los dioses y antepasados que hacían posible su prosperidad y, así, asegurarse su benevolencia. El templo de Holmul parece haber servido a tal propósito: los glifos de los laterales de la estructura lo identifican como «casa del linaje real»; es decir, un templo donde adorar a los antepasados de la familia gobernante.

Para desentrañar el friso, rico en símbolos, Estrada-Belli requirió la colaboración de Karl Taube, experto en iconografía maya de la Universidad de California en Riverside. El rey se sitúa en el centro, sentado sobre Witz, una deidad mitológica de la montaña. Las cuevas a los lados de la montaña simbolizan pasajes al inframundo y, al mismo tiempo, la fuente del viento y la lluvia. En el friso, el rey aparece sentado sobre una hendidura en la cima de la montaña, mientras que de los laterales de la boca de Witz emergen dos serpientes emplumadas que representan el viento. «Creo que se trata del blasón del rey yuxtapuesto sobre un lugar sagrado, posiblemente un lugar de origen. De la hendidura emergen los antepasados», señala Taube. Los mayas creían que los muertos, así como otros muchos seres sobrenaturales siniestros, moraban en la parte subterránea y subacuática del mundo. Las cuevas constituían pasajes entre el inframundo y el mundo de los vivos.

El rey aparece flanqueado por figuras que representan la muerte y la noche. Según Taube, se trata de dioses jaguar del inframundo. Dado que estos animales son depredadores nocturnos, los distintos grupos mayas les otorgaron una variedad de significados. Los jaguares simbolizaban el sol nocturno, el cual viajaba por la tierra de los muertos. Pero, mientras que en las obras mayas los reyes solían representarse realizando ofrendas a los dioses, este friso muestra a los dioses jaguar entregando ofrendas al rey. El porqué de esta inversión resulta confuso, aunque sí parece reflejar la importancia de Och Chan Yopaat y, por extensión, la de la familia gobernante.

Sin embargo, una franja de glifos en la base añade un giro inesperado a ese relato de vanagloria. El epigrafista de Harvard Alexandre Tokovinine, traductor de la inscripción, explica que, según esta, el templo lo encargó el rey de una ciudad vecina, mayor y más poderosa, llamada Naranjo. La inscripción lo identifica como la persona que restauró la dinastía gobernante de Holmul. Pero también enuncia que dicho rey era un vasallo, o gobernante subordinado, del jefe supremo de Kaanul. Así pues, por más que las imágenes del friso glorifiquen el lugar en el cosmos del rey de Holmul, los glifos revelan que esta ciudad se situaba en la base de una jerarquía de tres niveles. El rey de Holmul era vasallo del gobernante de Naranjo, quien, a su vez, era subordinado del jefe supremo de Kaanul. «Muestra que los reinos mayas estaban todos vinculados. No sabíamos cómo encajaba Holmul en el gran entramado geopolítico maya hasta que esta inscripción nos proporcionó toda esta información», afirma Estrada-Belli.

LA GUERRA ETERNA

Los detalles del friso se añaden a un creciente conjunto de indicios que contradice la visión tradicional de los antiguos mayas como gente pacífica. Entre 1995 y 2000, Simon Martin, de la Universidad de Pensilvania, y Nikolai Grube, de la de Bonn, descifraron y cartografiaron las relaciones de poder registradas en los monumentos de todo el mundo maya, desde el sur de México hasta el norte de Honduras. Su trabajo mostró que las hostilidades se sucedieron con frecuencia y que cada ciudad tenía su lugar en una estricta jerarquía. Aunque a título individual los reyes parecían independientes, todos estaban subordinados a las dinastías de Tikal o de Kaanul. «Estas parecen ser las superpotencias que ejercían una autoridad hegemónica sobre los demás reinos mayas», explica Estrada-Belli.

«La cuestión era quién iba a erigirse como actor principal», observa Martin. Hasta mediados del siglo VI parecía dominar Tikal. Una relación sólida con la poderosa ciudad estado de Teotihuacán, en el centro del actual México, habría ayudado a Tikal a expandir su influencia hacia el este por la península de Yucatán y la región del Petén, al norte de Guatemala. Pero Teotihuacán

Zach Zorich es periodista científico y editor colaborador de *Archaeology*.



se desmoronó hacia el año 550, y en el 562 Tikal sufrió una derrota militar devastadora. En la ciudad no se levantó ninguna gran construcción más en 130 años. Durante ese tiempo, los gobernantes de Kaanul comenzaron a expandir su poder por la región y Holmul fue una de las ciudades que quedó bajo su control.

Según Estrada-Belli, el hecho de que la dinastía de Holmul hubiera de ser «llamada al orden», como señalan los glifos del friso, sugiere que Tikal probablemente ya la había conquistado en algún momento del siglo v, con lo que habría expulsado del poder a la familia gobernante. Cuando el reino de Kaanul reconquistó la ciudad, restituyó el poder a la familia original. Tokovinine, sin embargo, propone otra interpretación: que los mandatarios de Naranjo dejaran de ser vasallos de Tikal para pasar a serlo de Kaanul y, con ellos, arrastraran a Holmul. En cualquier caso, la ubicación estratégica de Holmul, con la capital de Kaanul al norte y la ciudad de Tikal al oeste, hacía de ella una adquisición valiosa.

Aunque el rey de Holmul estaba subordinado al jefe supremo de Kaanul, pudo haber tenido libertad para actuar por su cuenta. A diferencia de imperios como el romano o el egipcio, que controlaban directamente los territorios conquistados, las superpotencias mayas preferían exigir un pago a las autoridades locales y dejar que continuaran gobernando. «Les interesaba crear relaciones de dominación y casi con toda seguridad cobrar tributos. Pero no les interesaba demasiado [establecer] tropas o expandir su territorio. En este sentido, el panorama se antoja muy descentralizado», explica Martin.

¿SUPERPOTENCIA O IMPERIO?

El carácter descentralizado del gobierno maya se sitúa en el centro del debate sobre si Tikal y Kaanul podían considerarse superpotencias o imperios. Según Martin, las áreas geográficas que controlaban eran demasiado pequeñas (la superficie de toda la región maya apenas superaba los 300.000 kilómetros cuadrados) y el dominio que ejercían sobre sus subordinados era demasiado inestable para equipararlos con los imperios de Europa, África y Asia. Estrada-Belli discrepa. Cree que, a medida que monumentos como el friso de Holmul revelan las relaciones de poder entre ciudades, cobra cuerpo la idea de que los mayas crearon imperios. «Es hora de cambiar de paradigma. Los mayas se asemejan más al tipo de cultura que es gobernada por un solo rey en cada momento, como la de Kaanul en este período. Así que se parecen más a algunas de las grandes civilizaciones del Viejo Mundo», argumenta.

Determinar si Kaanul y Tikal eran superpotencias o imperios reviste importancia para conocer tanto su funcionamiento diario como la razón por la que se declaraban la guerra tan a menudo. En cualquiera de los dos casos, lo más probable es que Holmul rindiese algún tipo de tributo a Naranjo, y esta, a Kaanul. Los indicios arqueológicos no aclaran, sin embargo, qué habría obtenido Holmul a cambio.

«Hubo cierta reciprocidad», opina Martin, quien especula con la posibilidad de que, a modo de incentivo para cooperar con las ambiciones de Kaanul, las élites de Holmul recibiesen obsequios exóticos e invitaciones para celebrar y representar ceremonias en la capital del reino.

David Freidel, de la Universidad de Washington en San Luis, no piensa así. Opina que el tributo que los gobernantes

MÉXICO
Dzibanche
(capital de Kaanul)
Tikal
(capital de Tikal)
Holmul
BELICE
GUATEMALA

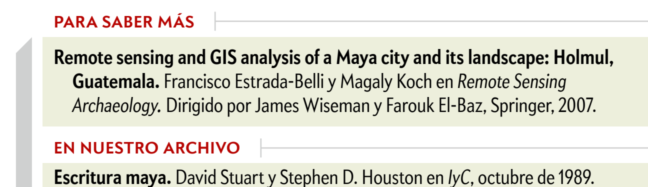
HOLMUL ocupaba una importante posición estratégica entre las capitales de Tikal y Kaanul.

MICHAEL NEWHOUSE

de Kaanul exigían a sus subordinados generó una relación económica muy desigual. «El flujo de recursos, incluidos bienes comerciales y guerreros para luchar en las interminables guerras, se dirigía hacia las capitales de las dos superpotencias. No cabe duda de que era una relación de explotación», sostiene.

Freidel, codirector de las excavaciones en otra ciudad vasalla de Kaanul, cree que, en numerosos aspectos, los reinos mayas se asemejaban a otros que erigían monumentos para glorificar a sus líderes, como ocurrió con las pirámides de Egipto o con los arcos del triunfo romanos. «Les encantaba la estética del poder. Todas las civilizaciones la adoran. Este friso constituye un ejemplo excelente. Y lo enterraron porque era bello y porque, de alguna manera, querían mantenerlo vivo», asegura. Es posible que enterraran el friso de Holmul para evitar enojar a los dioses y a los antepasados a los que rendía homenaje, ya que encima erigieron una construcción mayor. De este modo, los gobernantes de Holmul podían continuar levantando otros monumentos grandiosos y, al mismo tiempo, conservar los antiguos.

Aunque Friedel acepta la mayoría de las interpretaciones de Martin y Grube sobre el nuevo friso, reconoce que, a medida que los arqueólogos amplían sus conocimientos sobre las sociedades mayas, estas se van revelando más parecidas a imperios. El debate se podrá dirimir cuando terminen las investigaciones en el templo de Holmul, entre otros sitios. Estrada-Belli planea continuar la excavación del túnel rodeando el resto del edificio. También pretende explorar dos nuevas recámaras descubiertas en el interior del templo y seguir desenterrando sus muros exteriores. A pesar de su gran tamaño, el friso solo cubre la parte superior de un lado del edificio, por lo que podrían aparecer muchas más obras de arte en otras partes del monumento. De ser el caso, tal vez sepamos lo que el inestable destino deparó a Holmul en los largos siglos de contiendas entre esos dos antiguos reinos.



PARA SABER MÁS

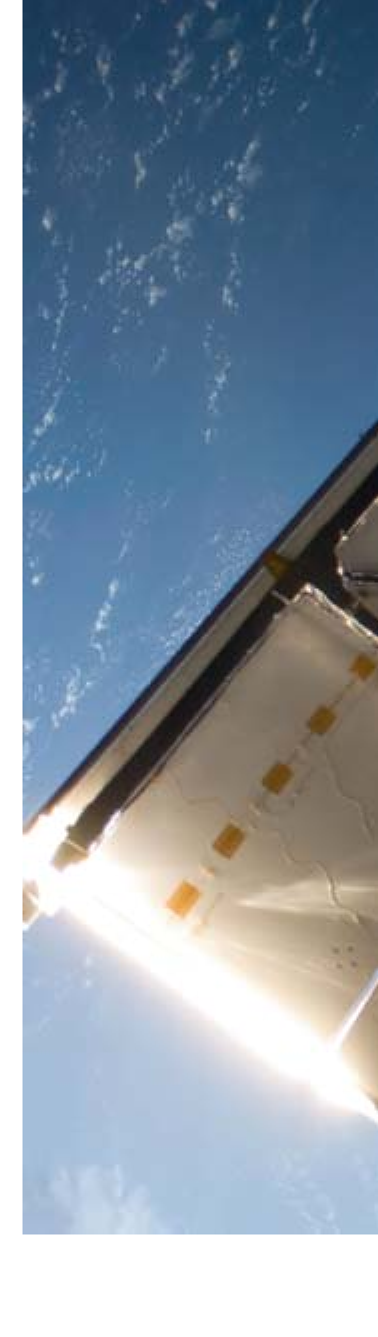
Remote sensing and GIS analysis of a Maya city and its landscape: Holmul, Guatemala. Francisco Estrada-Belli y Magaly Koch en *Remote Sensing Archaeology.* Dirigido por James Wiseman y Farouk El-Baz, Springer, 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

Escritura maya. David Stuart y Stephen D. Houston en *IyC*, octubre de 1989.

Axel M. Quetz es físico y redactor de *Sterne und Weltraum*.

Uwe Reichert es doctor en física aplicada y redactor jefe de *Sterne und Weltraum*.

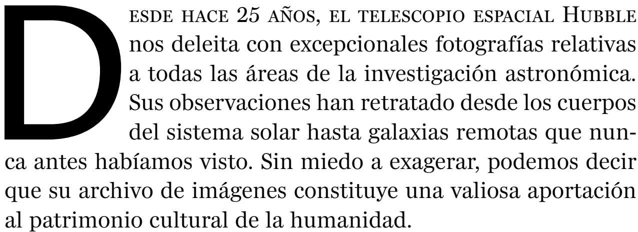


ASTRONOMÍA

Veinticinco años del Hubble

Un cuarto de siglo después de su puesta en órbita, el telescopio espacial Hubble sigue siendo uno de los mejores instrumentos astronómicos de todos los tiempos. Sus resultados han acuñado, en un sentido literal, la imagen que el público tiene del cosmos

Axel M. Quetz y Uwe Reichert



Desde hace 25 años, el telescopio espacial Hubble nos deleita con excepcionales fotografías relativas a todas las áreas de la investigación astronómica. Sus observaciones han retratado desde los cuerpos del sistema solar hasta galaxias remotas que nunca antes habíamos visto. Sin miedo a exagerar, podemos decir que su archivo de imágenes constituye una valiosa aportación al patrimonio cultural de la humanidad.

A pesar de la gran variedad de objetos celestes fotografiados por el Hubble, todas las imágenes guardan algo en común: su extraordinaria nitidez, posible gracias a un espejo de 2,4 metros de diámetro al que se le permite operar desde el espacio. El telescopio orbita alrededor de la Tierra a una altitud de 560 kilómetros, muy por encima de la atmósfera y sus efectos distorsionadores.

Hoy ya casi hemos olvidado que el observatorio, con un coste inicial de 2500 millones de dólares, no funcionó a la perfección desde el primer momento. Aunque su espejo primario fue pulido con gran precisión, su geometría se desviaba ligeramente de la buscada; sin duda, uno de los problemas técnicos más embarazosos de la historia de la ciencia. Durante tres años y medio, los astrónomos tuvieron que arreglárselas con fotografías borrosas que, tras grandes esfuerzos, lograban mejorar mediante técnicas de procesamiento de imagen. Por fortuna, el problema se solventó: en diciembre de 1993, la NASA envió el sistema de corrección óptica COSTAR a bordo de la lanzadera espacial *Endeavour*. Tras apresar el telescopio con el largo brazo mecánico del transbordador, los astronautas reemplazaron uno de sus instrumentos científicos con el dispositivo corrector. Desde entonces, el Hubble ve perfectamente.

Los progresos técnicos se han sucedido desde el lanzamiento del telescopio. Otras cuatro misiones de mantenimiento, en los años 1997, 1999, 2002 y 2009, han servido para dotar al Hubble de instrumentos ópticos cada vez más avanzados. Estos se



NASA

Mantenimiento en el espacio

El telescopio espacial Hubble fue construido de manera que su mantenimiento pudiera realizarse en órbita. Cinco misiones con transbordadores espaciales han servido para repararlo e incorporar mejoras técnicas. Durante la última de ellas, efectuada por la lanzadera *Atlantis* en mayo de 2009, los astronautas instalaron nuevos instrumentos y reemplazaron los giróscopos y baterías previos con nuevos modelos. Gracias a ello, lograron prolongar la vida útil del telescopio.

Ficha técnica

Con un espejo primario de 2,4 metros, el telescopio espacial Hubble sobrevuela la Tierra en una órbita casi circular y sin ningún tipo de propulsión. Estas son sus principales características.

Operadores:	NASA/ESA
Dimensiones:	13,1 metros de largo; 4,3 metros de diámetro máximo
Lanzamiento:	24 de abril de 1990
Altitud de la órbita:	560 kilómetros
Período orbital:	95,8 minutos
Fuentes de energía:	Paneles solares, 6 baterías
Mantenimiento:	5 misiones con transbordadores espaciales en 1993, 1997, 1999, 2002 y 2009
Instrumentos:	Cámara de Campo Amplio (WFC3, desde 2009); Espectrógrafo de Imágenes del Telescopio Espacial (STIS, desde 1997); Espectrógrafo de Orígenes Cósmicos (COS, desde 2009); Cámara Avanzada para Exploraciones (ACS, desde 2002)
Fin de la misión:	2024 (desintegración en la atmósfera)

diseñaron para compensar el error del espejo primario, con lo que al final el sistema COSTAR se tornó superfluo. En la última de estas misiones se instaló la tercera versión de una cámara de alta resolución, la Cámara de Campo Amplio 3 (Wide Field Camera 3). Con un campo de visión de 164 × 164 segundos de arco, cada uno de sus píxeles cubre una porción de cielo de 0,04 segundos de arco.

Pero la importancia científica del Hubble va mucho más allá de sus fotografías, indudablemente hermosas. Sus espectrógrafos han obtenido también excelentes resultados. Por esta razón, a pesar de su avanzada edad y de las alternativas que hoy ofrecen los telescopios terrestres modernos, el Hubble sigue siendo muy codiciado. Para el ciclo 22 (el período de observación entre octubre de 2014 y septiembre de 2015) se recibieron más de mil solicitudes que, en conjunto, suponían un tiempo de observación seis veces mayor que el disponible. Su producción científica no resulta menos impresionante. Hasta la fecha, se han publicado más de 12.000 artículos basados en los datos del telescopio.

En ausencia de problemas técnicos, el instrumento seguirá operando hasta 2024. Dado que carece de motores propios y que ya no hay lanzaderas espaciales que puedan transportarlo a una órbita más alta, sus días están contados. Debido al rozamiento con las moléculas atmosféricas que aún persisten a 560 kilómetros de la superficie terrestre, su altitud irá disminuyendo progresivamente. En 2024, el telescopio habrá descendido tanto que se desintegrará en la atmósfera.

Su sucesor, el telescopio espacial James Webb, tiene previsto su lanzamiento para 2018. A diferencia del Hubble, que observa principalmente en el visible, el James Webb ha sido diseñado para trabajar en el infrarrojo. Ello le permitirá cumplir con su misión científica de manera óptima, pero, sin duda, echaremos de menos las impactantes fotos del Hubble. A modo de homenaje en el mes de su vigésimo quinto aniversario, a continuación rescatamos algunas.

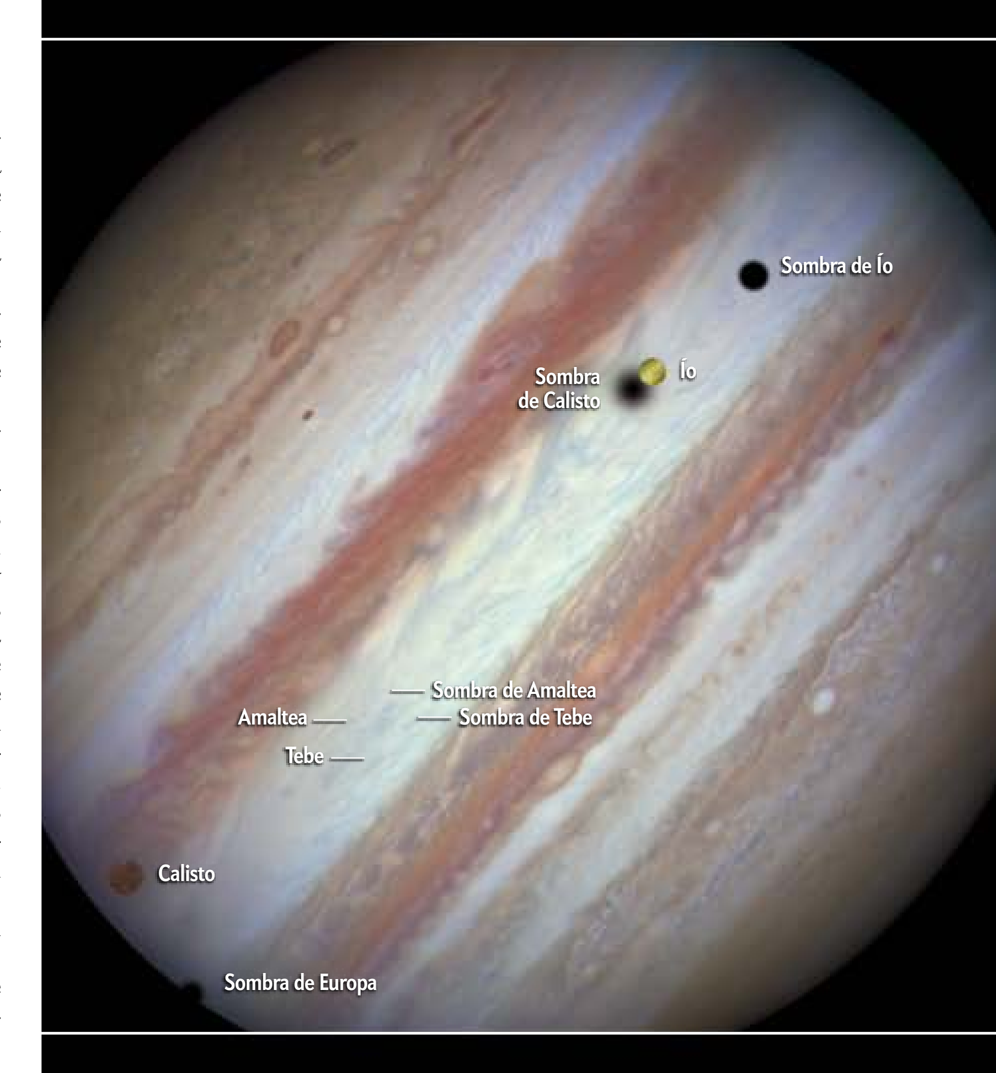
PARA SABER MÁS

15 Jahre Weltraumteleskop Hubble: Chronik der Mission. T. Althaus en *Sterne und Weltraum*, julio de 2005.

EN NUESTRO ARCHIVO

Primeros resultados del telescopio espacial Hubble. Eric J. Chaisson en *IyC*, agosto de 1992.

Los 10 descubrimientos principales del Hubble. Mario Livio en *IyC*, septiembre de 2006.



Encélado
Dione

Sombras sobre Saturno

Cada 14 o 15 años, los anillos de Saturno se ven de canto desde la Tierra. Dado que los satélites del gigante gaseoso orbitan aproximadamente en el mismo plano que el que ocupa su sistema de anillos, la alineación permite admirar los tránsitos de sus lunas y ver sus sombras proyectadas sobre el planeta. El 24 de febrero de 2009, el Hubble captó imágenes de cuatro satélites cuando pasaban por delante del planeta anillado. El mayor de ellos, Titán, proyecta su silueta sobre el polo norte. Cerca de él se encuentra Mimas, una luna mucho menor cuya diminuta sombra cae sobre las nubes cercanas al ecuador. Fuera del disco planetario pueden verse Dione y Encélado. Aunque en el momento de la fotografía Saturno se encontraba a 1250 millones de kilómetros de la Tierra, el Hubble logró distinguir detalles de hasta 300 kilómetros de ancho sobre la superficie del gigante gaseoso.

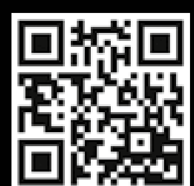
El tránsito de las lunas de Saturno y sus sombras puede verse en hubblesite.org/newscenter/archive/releases/solar%20system/2009/12/video/b/



Júpiter y sus lunas

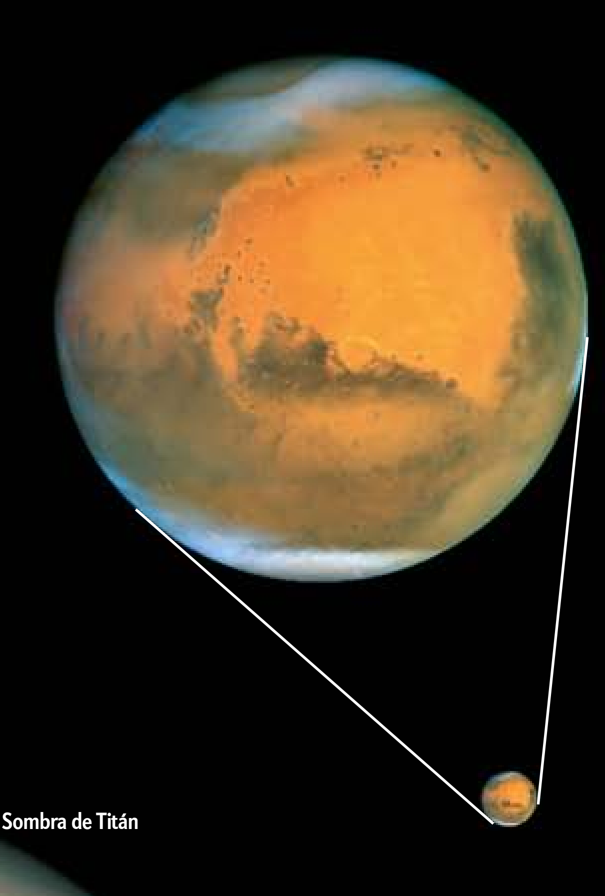
De tanto en tanto, desde la Tierra puede verse cómo uno de los cuatro satélites galileanos cruza el disco de Júpiter. En raras ocasiones, varias de sus sombras se ciernen al mismo tiempo sobre la superficie el planeta. Un tránsito múltiple se produjo hace cuatro meses, el 24 de enero. Calisto e Ío pasan por delante del disco, mientras sus sombras y la de Europa —a la izquierda y fuera de la imagen— se ven como manchas oscuras sobre las nubes jovianas. Un ojo bien entrenado distinguiría también las pequeñas lunas Amaltea y Tebe, así como sus sombras sobre el planeta.

El tránsito de los satélites galileanos y sus sombras puede verse en spacetelescope.org/videos/heic1504a/



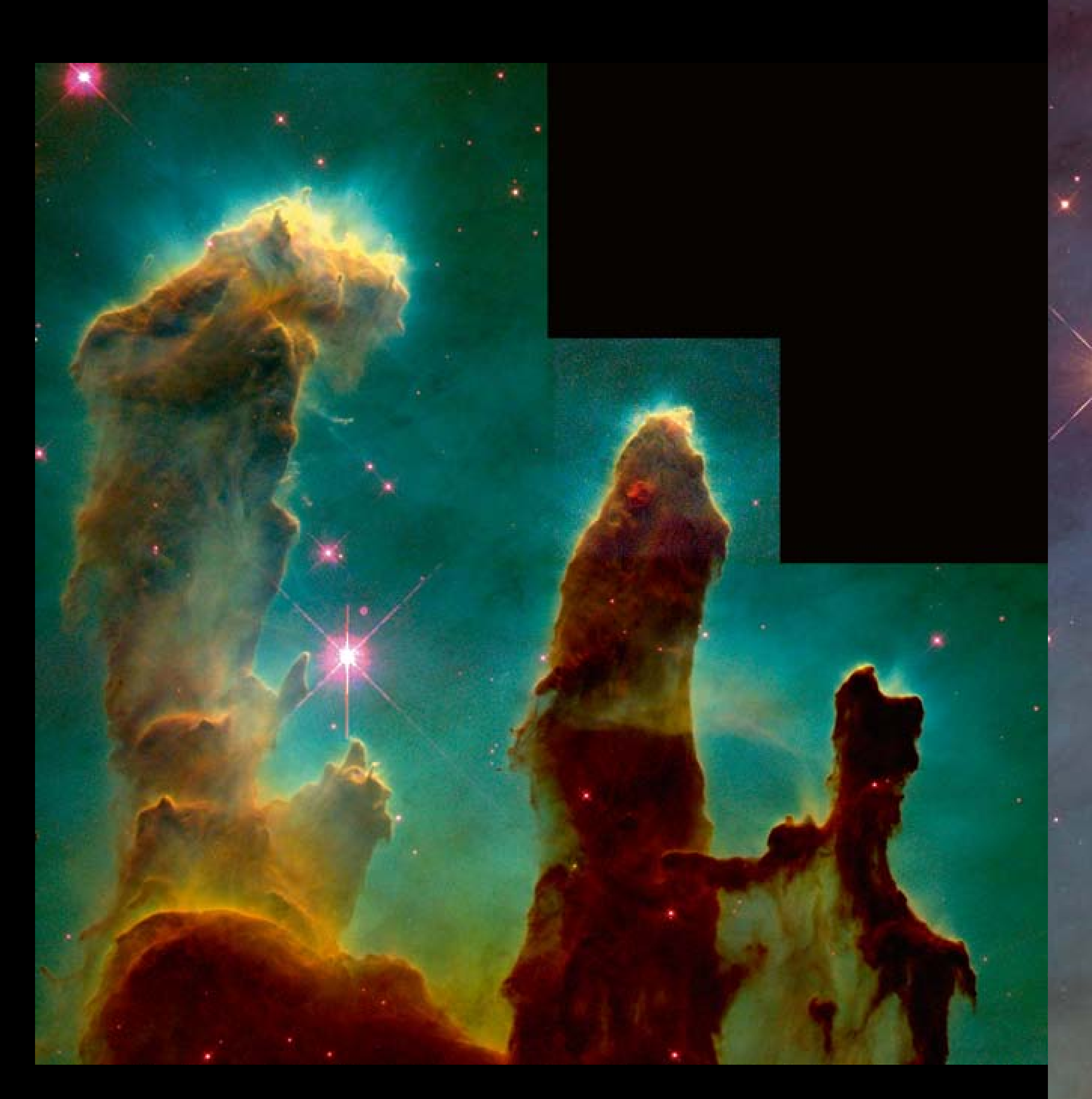
Nuestro modesto vecino

Debido a su pequeño tamaño aparente, Marte resulta ingrato a la observación astronómica: la imagen inferior lo muestra a la misma escala que Júpiter y Saturno en esta misma página. A pesar de todo, el Hubble puede distinguir detalles de hasta 16 kilómetros sobre la superficie del planeta rojo. Esta imagen, tomada el 26 de junio de 2001, revela nubes de hielo de color blanquecino y tormentas de polvo en tonos anaranjados.



Sombra de Titán
Titán
Mimas
Sombra de Mimas

NASA/ESA/STScI/AURA/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE



Los Pilares de la Creación: 1995 y 2015

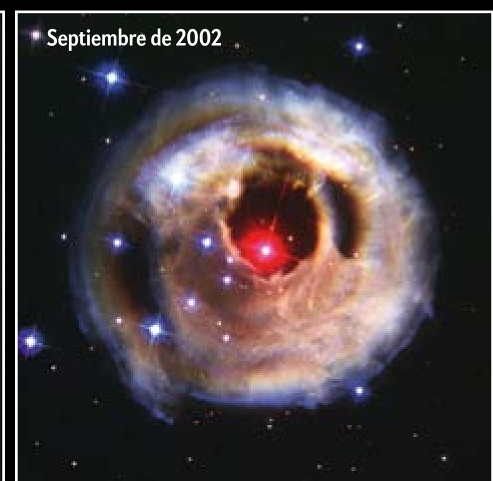
Una de las imágenes más reproducidas del Hubble fue tomada en 1995 (*arriba*). Bautizadas como los Pilares de la Creación, estas columnas de polvo e hidrógeno gaseoso se alzan en el centro de la nebulosa del Águila, o M16, situada a 6500 años luz de la Tierra, en la constelación de Serpens. Con una longitud de unos cuatro años luz, constituyen una región de formación estelar remanente de una nube molecular mayor, en la que el gas se contrajo por efecto de la gravedad y dio lugar a varias protoestrellas. Tras la ignición de las estrellas jóvenes, los vientos estelares y la radiación ultravioleta comenzaron a disolver la nube inicial. Los pilares son las zonas que aún sobreviven a la erosión, como si de formaciones rocosas expuestas a las inclemencias del tiempo se tratase.

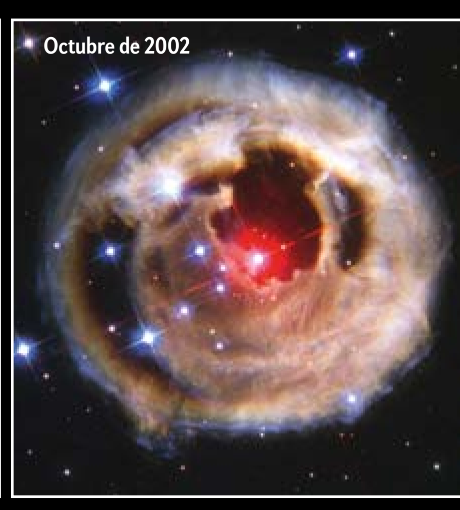
El Hubble fotografió la misma región veinte años después (*derecha*). Gracias a sus mejores cámaras, la nueva imagen goza de una resolución y un contraste mucho mayores: una riqueza de detalles que ha permitido estudiar en más detalle el proceso de formación estelar. Los diferentes colores se deben a la composición de varias exposiciones, correspondientes a distintos intervalos de longitudes de onda.

NASA/ESA/STScI/J. HESTER/P. SCOWEN/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA (*Pilares de la Creación*, 1995); NASA/ESA/HUBBLE/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE (*Pilares de la Creación*, 2015)



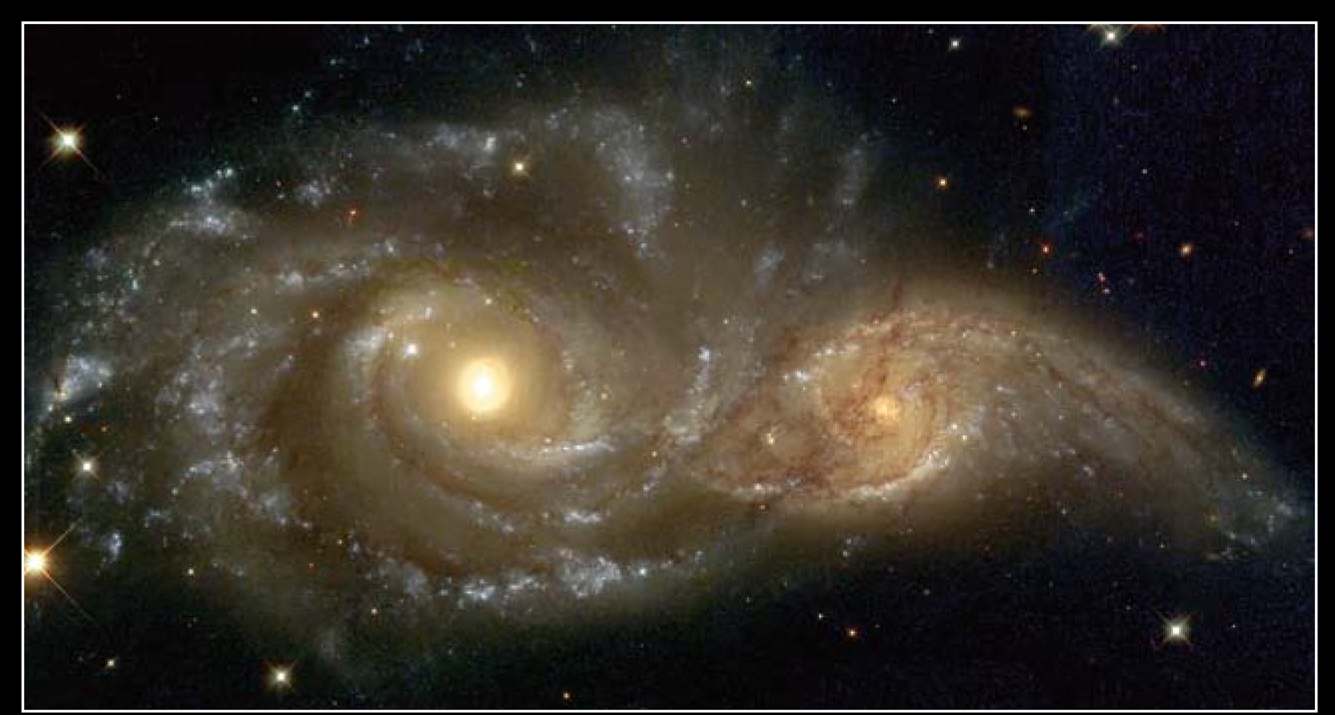
Mayo de 2002





El eco de la supergigante roja V838 Monocerotis

La primera impresión que transmite esta serie de imágenes de la supergigante roja V838 Monocerotis, en la constelación de Monoceros, resulta engañosa: no es que la capa de polvo que rodea a la estrella se esté expandiendo, sino que un halo de luz ilumina zonas cada vez más distantes de una nube de polvo. Expulsada por la estrella en erupciones previas, dicha nube se mantuvo prácticamente inalterada desde que el astro emitió un intenso destello de luz. Su apariencia cambiante se debe a que primero llegó a nuestro planeta la luz que viajó en línea recta. En los instantes posteriores, se observa la radiación reflejada en la nube de polvo a lo largo de una superficie con forma de paraboloide de revolución. Cuanto más tarda la luz en llegar a la Tierra, mayor es el tamaño del paraboloide correspondiente. De esta manera, el fenómeno ha ido revelando poco a poco regiones cada vez más externas de la capa de polvo. Todas las imágenes de esta serie se encuentran a la misma escala.



Danza cósmica

Las galaxias espirales NGC 2207 (*izquierda*) e IC 2163 (*derecha*), en la constelación del Can Mayor, parecen una pareja de baile sobre un escenario cósmico... solo que su número ha durado miles de millones de años. La atracción gravitatoria ha deformado de manera considerable la menor de ellas, a la que ha arrancado corrientes de gas y estrellas, las cuales se extienden unos 100.000 años luz hacia la derecha de la imagen. En un futuro lejano, ambas galaxias se fundirán en una sola.

NASA/ESA/H. E. BOND/STScI (*V838 Monocerotis*); NASA/ESA/STScI/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE (*NGC 2207 e IC 2163*)







El Espirógrafo

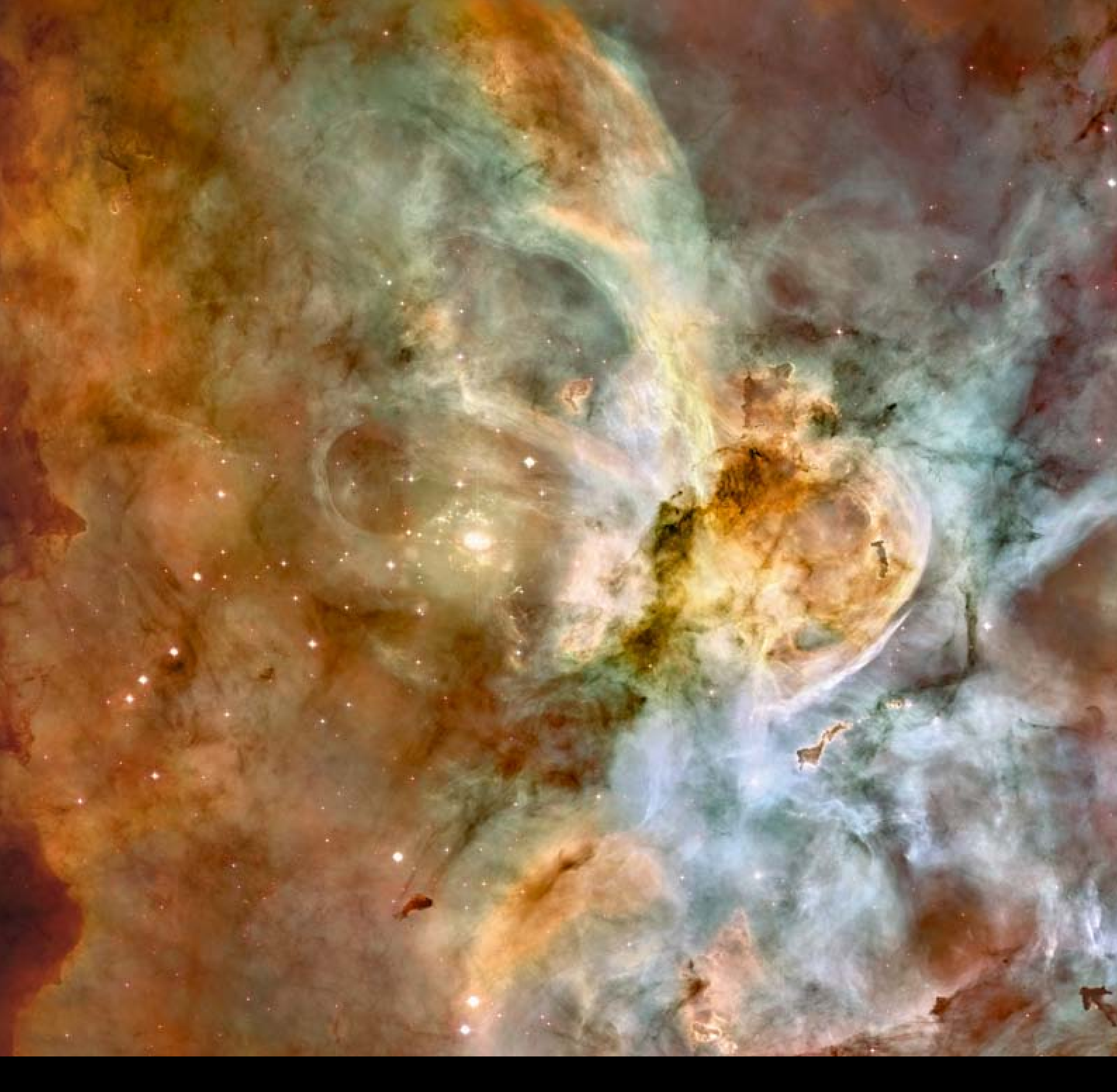
La nebulosa planetaria IC 418, en la constelación de Lepus, brilla como si de una gema se tratase. A pesar de su nombre, estas nebulosas poco tienen que ver con los planetas: surgen cuando una estrella similar al Sol llega al final de sus días y expulsa sus capas externas. Aunque IC 418 puede observarse con un telescopio de aficionado, esta imagen en colores falsos del Hubble revela las sutiles estructuras geométricas que le valieron el apodo de «nebulosa del Espirógrafo».



Galaxias en colisión

Arp 148, el objeto número 148 en el catálogo de galaxias peculiares compilado por Halton Arp, es una de las fusiones galácticas estudiadas por el telescopio Hubble. Se encuentra a casi 500 millones de años luz de la Tierra, en la zona del cielo que ocupa la Osa Mayor. Su peculiar forma obedece al resultado de la colisión: al parecer, el impacto entre las nubes de gas creó una onda de choque que hizo que la materia se propagase hacia fuera y formase un anillo. Dado que las estrellas son diminutas en comparación con la distancia que las separa, salen indemnes de este cataclismo cósmico; simplemente, se ven desplazadas hacia otras órbitas.

NASA/ESA/STSCI/AURA/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE (*nebulosa del Espirógrafo*); NASA/ESA/STSCI/AURA/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE, ESA/COLABORACIÓN HUBBLE/NASA/ESA/H. E. BOND/STSCI, A. EVANS/UNIVERSIDAD DE VIRGINIA EN CHARLOTTESVILLE/NRAO/UNIVERSIDAD STONY BROOK/K. NOLL/STScI/J. WESTPHAL/CALTECH (*Arp 148*)



Nubes y colosos estelares

La imagen superior conforma una de las mayores panorámicas tomadas por el Hubble. Muestra una región de 50 años luz de ancho en el centro de la nebulosa de Carina, situada a unos 7500 años luz de la Tierra. La pintoresca mezcla de nubes de gas y polvo es el resultado de la radiación ultravioleta y los vientos estelares emitidos por estrellas gigantes: más de una docena de ellas, cada una con una masa de entre 50 y 100 veces la del Sol, se ocultan bajo la nebulosa. Sus vientos y su radiación de alta energía van destruyendo poco a poco los restos de la nube molecular a partir de la cual se originaron, al tiempo que desencadenan la formación de otras estrellas. Una de estas estrellas gigantes es Eta Carinae, que explotará en forma de supernova en un futuro no muy lejano. Hace 4600 millones de años, la formación del Sol y otras estrellas cercanas pudo haber tenido lugar a partir de procesos tan turbulentos como los que se observan en la nebulosa de Carina.

Con un poco de imaginación, en el colorido paisaje de la nebulosa podremos reconocer calaveras, dragones y otros objetos legendarios. La propia constelación de Carina, en la que se observa esta nebulosa, hace referencia a la quilla (*carina*, en latín) de la antigua constelación de Argo Navis, la nave de los argonautas que, capitaneada por Jasón, navegó desde Grecia hasta la costa este del Mar Negro en busca del vellocino de oro.

NASA/ESA, N. SMITH/UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN BERKELEY STScI/AURA/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE



NASA/ESA/M. LIVIO/EQUIPO DEL VIGÉSIMO ANIVERSARIO DEL HUBBLE/STScI

La imagen de la derecha, tomada en 2010, reproduce un detalle de la nebulosa. Al igual que los Pilares de la Creación, estas torres de polvo y gas de unos tres años luz de largo constituyen una región de formación de estrellas. En la cima de los pilares pueden distinguirse chorros de materia que fluyen en direcciones opuestas. Conocidos como objetos de Herbig-Haro, estos revelan la existencia de estrellas recién nacidas.



LA BATALLA CONTRA EL ÉBOLA

El mayor brote hasta la fecha ha conseguido arrancar el desarrollo de dos vacunas y un par de tratamientos esperanzadores

Helen Branswell



BLINDAJE: Trabajadores de un hospital se enfundan el equipo de protección antes de entrar en un sala de ébola en Monrovia, Liberia.

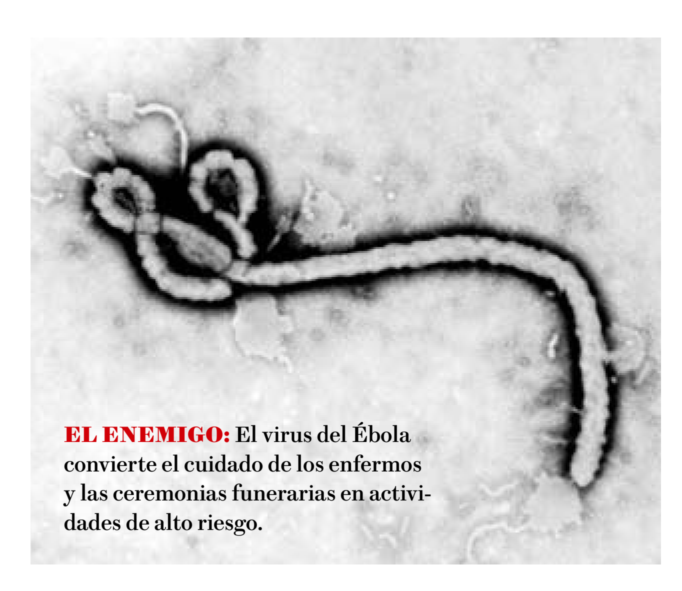
Helen Branswell es la reportera especializada en medicina de *The Canadian Press*. Su interés por las enfermedades emergentes nació a raíz de su cobertura de la epidemia de síndrome respiratorio agudo grave de 2003.

Los investigadores suelen hablar con frecuencia de la carrera que el virus del Ébola emprende contra la persona infectada. Esta vencerá si su sistema inmunitario logra derrotar al virus antes de que destruya sus órganos. Una población se impondrá si consigue aislar a los primeros infectados antes de que la enfermedad se propague. La humanidad ganará la carrera si halla tratamientos y, a la larga, una vacuna antes de que el virus se haga fuerte en las urbes del globo.

El virus del Ébola ha gozado durante años de una ventaja natural. Los brotes eran demasiado reducidos (menos de cien personas) y demasiado efímeros (menos de cinco meses) para ensayar tratamiento alguno. La amenaza se disipaba antes de poder iniciar un estudio clínico con garantías. Los laboratorios farmacéuticos y los equipos de investigación difícilmente podían justificar la inversión de dinero en una enfermedad que, por horrible que fuera, ha tardado cuatro décadas en apuntarse sus primeras 1600 víctimas. Había otros males que parecían más preocupantes: el paludismo, la tuberculosis y el VIH mataron en 2013 a más de tres millones de personas.

Ese frío cómputo ha cambiado a raíz de la inusitada epidemia de ébola que en estos momentos azota África occidental, la mayor y más prolongada de la historia. A mediados de enero, el número de infectados por el virus en Sierra Leona, Liberia y Guinea ascendía al menos a 21.000 y los muertos superaban los 8400. Las autoridades sanitarias internacionales, conscientes de que el virus se propagaría mucho más allá de los focos iniciales si no se intervenía de inmediato, hicieron un llamamiento para que se diera una respuesta a escala mundial. El objetivo era diagnosticar y aislar a los infectados; construir docenas de centros de emergencia y dotarlos de personal para atender a los enfermos, y reclutar suficientes equipos de sepultureros para enterrar en condiciones seguras a los fallecidos.

Por primera vez, los científicos tienen ante sí un brote de ébola lo bastante extenso y prolongado para emprender estudios clínicos profundos en busca de tratamientos mejores; un brote que podría ser imposible de contener sin vacunas o fármacos nuevos. También disponen, por primera vez, de un amplio consenso para ensayar en condiciones prácticas algunos tratamientos experimentales. Quizás este despliegue de medios sin precedentes resulte más útil para hacer frente al próximo brote que para atajar la epidemia en curso. Pero si los investigadores triunfan ahora, tal vez puedan asegurarse de que el ébola no lleve las de ganar cuando ataque de nuevo —cosa que sucederá.



EL ENEMIGO: El virus del Ébola convierte el cuidado de los enfermos y las ceremonias funerarias en actividades de alto riesgo.

PATÓGENO REFINADO

Quizá sorprenda saber que, pese a la oleada de casos declarados en los últimos dieciséis meses, el virus del Ébola es un gran desconocido: ignoramos dónde habita, de qué modo infecta esporádicamente a los humanos y por qué no se infectan más personas cuando inicia su propagación. (En promedio, cada infectado ha transmitido el virus a una o dos personas, a diferencia de otras enfermedades sumamente contagiosas, como el sarampión, en que cada afectado suele contagiar a 18 personas.)

EN SÍNTESIS

Mientras los brotes de ébola fueron pequeños y esporádicos, había pocas posibilidades de investigar y distribuir nuevas vacunas o mejores tratamientos.

El brote actual de África occidental, el más extenso hasta ahora registrado, ofrece la oportunidad de estudiar nuevas estrategias de atención y recursos para luchar contra este patógeno devastador.

Los investigadores se apresuran a ensayar unos pocos tratamientos experimentales y posibles vacunas, con la esperanza de evitar miles de muertes más.

PÁGINAS ANTERIORES: DANIEL BEREHULAK REDUX PICTURES; ESTA PÁGINA: GETTY IMAGES







AFÁN DE VIVIR: En Liberia se rocía con desinfectante a un operario que acaba de sacar cadáveres de las casas (*1*); un hombre se encamina a desinfectar el domicilio de un paciente (*2*); y una familia da la bienvenida a Garmai Sayon (*centro*), de vuelta entre los suyos tras sobrevivir a la infección (*3*).

DANIEL BEREHULAK, REDUX PICTURES

No es el virus más contagioso, pero sí uno de los más mortíferos para los humanos y los primates. A finales de 2014 se calculaba que el 70 por ciento de las personas infectadas en África occidental habían sucumbido a la enfermedad, generalmente en cuestión de días y a menudo sin el conocimiento de las autoridades sanitarias.

La rapidez y virulencia con la que el ébola ataca depende por lo menos de dos factores: la cantidad de virus y la vía de penetración en el cuerpo. Una vez que las primeras partículas víricas superaron la barrera interespecífica que separaba a los humanos de los murciélagos frugívoros —presunto origen del virus—, no se precisó mucho para mantener en marcha la cadena de contagio. Numerosas víctimas contraen la infección mientras preparan el cadáver de un familiar fallecido por el ébola. Limpiar el vómito de la barbilla del enfermo o la diarrea de un niño infectado son otras vías de contagio: el virus se introduce en el organismo del cuidador cuando este se toca con las manos contaminadas los ojos, los labios, la nariz o la boca. Y si, por mala fortuna, el virus penetra directamente en el torrente sanguíneo en número suficiente, como puede suceder por el pinchazo fortuito con una aguja, entonces no hay salvación posible, advierte Thomas Geisbert, microbiólogo de la Universidad de Texas.

Las autopsias y los exámenes anatomopatológicos de las víctimas representarían uno de los mejores métodos para estudiar la diseminación del virus en el organismo. Pero debido al grave riesgo de infección accidental en el curso de los procedimientos, forzosamente cruentos, estos se han llevado a cabo muy pocas veces. Una reciente revisión científica solo consiguió hallar 29 casos en que se practicara la autopsia en los casi 40 años de historia de la enfermedad.

Con todo, los estudios anatomopatológicos y con animales realizados hasta la fecha demuestran que el ébola lanza un primer ataque devastador contra el sistema inmunitario. A semejanza de otros virus, se adueña de la maquinaria de las células infectadas para fabricar multitud de copias de sí mismo. Entre sus primeros objetivos se hallan las células dendríticas, auténticos centinelas que patrullan por los tejidos del cuerpo, y los macrófagos, que devoran las células dañadas. En lugar de eludir estos primeros efectivos, el patógeno los acosa para multiplicarse en su interior. Este ataque audaz logra un doble propósito: impide que estas células den la voz de alarma al resto del sistema inmunitario, y se apodera de un vehículo perfecto para viajar oculto hasta los ganglios linfáticos, el hígado, el bazo y otras partes del cuerpo.

El virus no se contenta con esta táctica y recurre a otra artimaña para pasar inadvertido: lanza un señuelo con el que

confunde al sistema inmunitario. Obliga a las células infectadas a sintetizar y liberar en el torrente sanguíneo grandes cantidades de glucoproteína soluble, o GPs, sustancia muy semejante a una molécula primordial (denominada GP) que sobresale de la cubierta externa de los virus. Normalmente, las defensas reconocen la GP y destruyen los virus que la llevan incorporada. Pero el ébola, al incitar al sistema inmunitario a que ataque a la GPs (que, por supuesto, en este caso no está unida a ningún virus), socava aún más la capacidad del cuerpo para organizar una defensa eficaz.

LOS NUEVOS TRATAMIENTOS

La última epidemia ha enseñado a los médicos y al resto del personal sanitario algunas formas prácticas de vencer el virus. Hace tiempo que se sabe que, a pesar de los primeros reveses, el sistema inmunitario puede recobrarse y superar la infección si dispone del tiempo suficiente. El personal sanitario ha confirmado en la actual epidemia que es posible conceder a los pacientes parte de ese precioso tiempo si comienzan a recibir líquidos por vía intravenosa poco después de la aparición de los primeros síntomas. La Organización Mundial de la Salud ha aprobado tratar al menos a algunos infectados con sangre de supervivientes, que, por definición, debe contener multitud de anticuerpos, aunque se ignora si este tratamiento es eficaz.

La arriesgada decisión de aceptar un tratamiento no ensayado da buena prueba de la situación desesperada que se está viviendo en África occidental. En teoría, la estrategia es lógica. El suero de convalecientes permitió combatir con éxito la poliomielitis entre los años veinte y cincuenta del siglo xx, así como la pandemia de gripe de 1918. La Fundación Bill y Melinda Gates ha comenzado a financiar estudios clínicos con sueros antiébola en Guinea, gravemente afectada por la epidemia.

Por supuesto, gracias a la revolución biotecnológica, ahora es posible fabricar los anticuerpos necesarios y así se ha hecho en una preparación llamada ZMapp, compuesta por tres anticuerpos monoclonales dirigidos contra el virus del Ébola. ZMapp adquirió una condición casi mítica el pasado verano cuando Kent Brantly, un médico misionero estadounidense que había contraído la infección en Liberia, se convirtió en el primer receptor del tratamiento. Los medios de comunicación relataron cómo Brantly, que ya se hallaba gravemente enfermo cuando recibió la primera transfusión, mejoró con rapidez y pudo tomar una ducha por su propio pie al día siguiente. Cuando se lo trató había menos de una docena de tandas de tratamiento disponibles (cada tanda se compone de tres transfusiones) y en un par de semanas esta pequeña reserva se agotó.

ZMapp estaba en la fase inicial de desarrollo (se estaba ensayando en animales) y la producción comercial no había comenzado cuando estalló la epidemia. La fabricación se ha acelerado con la esperanza de que los estudios clínicos comenzaran en África occidental durante el primer trimestre de 2015. Pero aunque demuestre ser eficaz, nadie duda de que no habrá suficiente ZMapp para tratar a todo aquel que lo necesite en un futuro próximo.

Los médicos ni siquiera habrían dispuesto de él para empezar a trabajar si los Gobiernos no hubiesen comenzado a invertir dinero en el estudio de antídotos ante la amenaza de que alguien convirtiera el ébola en un arma biológica. Especialistas del Laboratorio Nacional de Microbiología de Canadá y del Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas de EE.UU. (NIAID) han investigado y sintetizado los anticuerpos que componen el cóctel y han concedido la licencia de fabricación a

BIOLOGÍA DE UN PATÓGENO PERVERSO

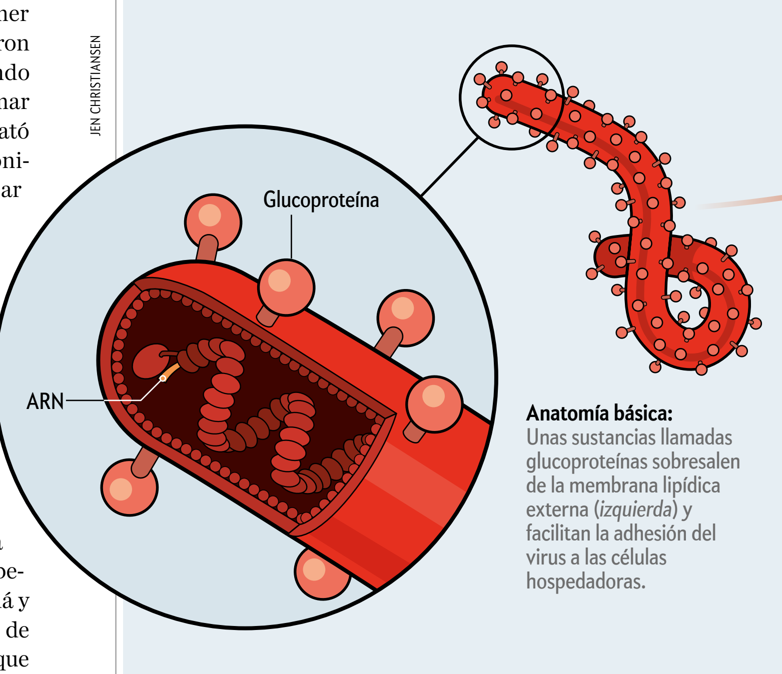
Cómo el ébola asola vidas

En las primeras fases de la infección, el virus asesta un golpe devastador al sistema inmunitario y al aparato circulatorio. El ataque paraliza las defensas del organismo y le permite multiplicarse a placer por células de todo el cuerpo. El colapso simultáneo de la red de vasos sanguíneos y las consiguientes hemorragias le prestan nuevas oportunidades para infectar a otras personas.

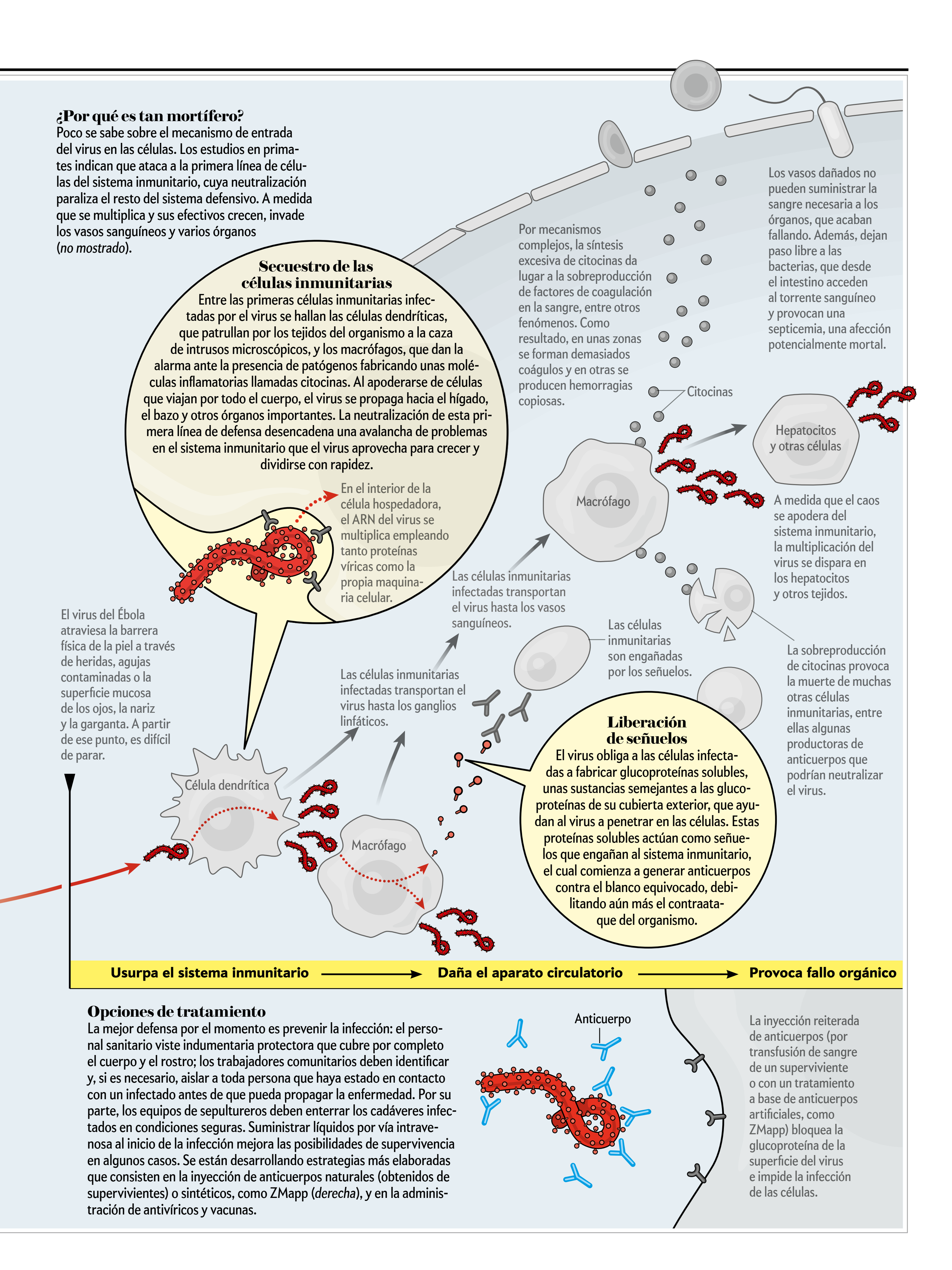
¿Qué es el ébola?
Perteneciente a la familia Filoviridae (así llamada porque sus integrantes adoptan formas filamentosas), el virus del Ébola consta de una cadena sencilla de ARN y proteínas asociadas, envueltas por una membrana lipídica. Hasta el momento se han descubierto y cultivado dos miembros de la familia, el virus del Ébola y el de Marburgo. Se han secuenciado los genes de un tercero (el virus de Lloviu, descubierto en la cueva homónima, en Asturias), aunque este aún no se ha caracterizado del todo en el laboratorio. De las cinco cepas conocidas del virus del Ébola (*abajo*), la Reston es la única que aparentemente no resulta patógena para los humanos.



JEN CHRISTIANSEN



Anatomía básica: Unas sustancias llamadas glucoproteínas sobresalen de la membrana lipídica externa (*izquierda*) y facilitan la adhesión del virus a las células hospedadoras.



¿Por qué es tan mortífero?
Poco se sabe sobre el mecanismo de entrada del virus en las células. Los estudios en primates indican que ataca a la primera línea de células del sistema inmunitario, cuya neutralización paraliza el resto del sistema defensivo. A medida que se multiplica y sus efectivos crecen, invade los vasos sanguíneos y varios órganos (*no mostrado*).
Secuestro de las células inmunitarias
Entre las primeras células inmunitarias infectadas por el virus se hallan las células dendríticas, que patrullan por los tejidos del organismo a la caza de intrusos microscópicos, y los macrófagos, que dan la alarma ante la presencia de patógenos fabricando unas moléculas inflamatorias llamadas citocinas. Al apoderarse de células que viajan por todo el cuerpo, el virus se propaga hacia el hígado, el bazo y otros órganos importantes. La neutralización de esta primera línea de defensa desencadena una avalancha de problemas en el sistema inmunitario que el virus aprovecha para crecer y dividirse con rapidez.
En el interior de la célula hospedadora, el ARN del virus se multiplica empleando tanto proteínas víricas como la propia maquinaria celular.
El virus del Ébola atraviesa la barrera física de la piel a través de heridas, agujas contaminadas o la superficie mucosa de los ojos, la nariz y la garganta. A partir de ese punto, es difícil de parar.
Célula dendrítica
Macrófago
Las células inmunitarias infectadas transportan el virus hasta los ganglios linfáticos.
Las células inmunitarias infectadas transportan el virus hasta los vasos sanguíneos.
Por mecanismos complejos, la síntesis excesiva de citocinas da lugar a la sobreproducción de factores de coagulación en la sangre, entre otros fenómenos. Como resultado, en unas zonas se forman demasiados coágulos y en otras se producen hemorragias copiosas.
Los vasos dañados no pueden suministrar la sangre necesaria a los órganos, que acaban fallando. Además, dejan paso libre a las bacterias, que desde el intestino acceden al torrente sanguíneo y provocan una septicemia, una afección potencialmente mortal.
Citocinas
Macrófago
Hepatocitos y otras células
A medida que el caos se apodera del sistema inmunitario, la multiplicación del virus se dispara en los hepatocitos y otros tejidos.
Las células inmunitarias son engañadas por los señuelos.
La sobreproducción de citocinas provoca la muerte de muchas otras células inmunitarias, entre ellas algunas productoras de anticuerpos que podrían neutralizar el virus.
Liberación de señuelos
El virus obliga a las células infectadas a fabricar glucoproteínas solubles, unas sustancias semejantes a las glucoproteínas de su cubierta exterior, que ayudan al virus a penetrar en las células. Estas proteínas solubles actúan como señuelos que engañan al sistema inmunitario, el cual comienza a generar anticuerpos contra el blanco equivocado, debilitando aún más el contraataque del organismo.
Usurpa el sistema inmunitario → Daña el aparato circulatorio → Provoca fallo orgánico
Opciones de tratamiento
La mejor defensa por el momento es prevenir la infección: el personal sanitario viste indumentaria protectora que cubre por completo el cuerpo y el rostro; los trabajadores comunitarios deben identificar y, si es necesario, aislar a toda persona que haya estado en contacto con un infectado antes de que pueda propagar la enfermedad. Por su parte, los equipos de sepultureros deben enterrar los cadáveres infectados en condiciones seguras. Suministrar líquidos por vía intravenosa al inicio de la infección mejora las posibilidades de supervivencia en algunos casos. Se están desarrollando estrategias más elaboradas que consisten en la inyección de anticuerpos naturales (obtenidos de supervivientes) o sintéticos, como ZMapp (*derecha*), y en la administración de antivíricos y vacunas.
Anticuerpo
La inyección reiterada de anticuerpos (por transfusión de sangre de un superviviente o con un tratamiento a base de anticuerpos artificiales, como ZMapp) bloquea la glucoproteína de la superficie del virus e impide la infección de las células.

Mapp Biopharmaceutical, que a su vez depende de Kentucky BioProcessing, para multiplicar los anticuerpos en plantas de tabaco genéticamente modificadas. Kentucky BioProcessing produce anticuerpos suficientes para fabricar entre 17 y 25 tratamientos completos por lote; el cultivo de las plantas requiere 12 semanas, y el procesamiento del material, otro par.

Ante esa situación se está intentado acelerar la producción de ZMapp. El Gobierno estadounidense, bajo la dirección de las autoridades de salud pública, estudia incorporar otro fabricante con el objetivo de multiplicar por cuatro o por cinco la producción. También hay en marcha estudios con primates para averiguar si es posible reducir el número o el volumen de las infusiones terapéuticas y tratar así a más pacientes con las mismas existencias.

LA ESPERADA VACUNA

Tanto ha sido el tiempo perdido en reconocer el alcance real de la propagación del virus en África occidental que la epidemia ha acabado fragmentándose en docenas de minúsculos brotes dispersos, con sus propias características epidemiológicas. El personal sanitario y militar y las comunidades locales están haciendo esfuerzos heroicos por salvar vidas y contener la enfermedad. Pero a los especialistas les preocupa el hecho de que, cuanto más dure la epidemia, más grande será el riesgo de que el ébola se extienda hacia otros puntos de África occidental. Y para colmo de males, la paralización de los sistemas sanitarios que el virus ha provocado en los países afectados podría desatar otras crisis de salud pública, como brotes de sarampión o incluso la reaparición de la poliomielitis.

Una de las mejores formas de evitar ese futuro sombrío estriba en crear, ensayar y distribuir una vacuna, algo que resultaba imposible en los anteriores brotes, más pequeños y efímeros. Cuando el número de afectados comenzó a crecer vertiginosamente en Guinea, Liberia y Sierra Leona al final del pasado verano, las agencias encargadas de dirigir la respuesta internacional determinaron que el único medio para frenar la epidemia era contar con una vacuna eficaz.

A finales de 2014 se llevaron a cabo estudios de seguridad de las dos principales vacunas experimentales, cAd3-EBO y rVSV-ZEBOV, con la colaboración de cientos de voluntarios de EE.UU., Canadá, Europa y varios países africanos no afectados. A principios de este año debían comenzar en Liberia y Sierra Leona estudios más extensos con miles de personas, a los que pronto se sumarán estudios en Guinea.

La celeridad del proceso es inaudita: una labor que en circunstancias normales duraría entre cinco y diez años (los ensayos y la producción a gran escala de la vacuna), se está ultimando en menos de un año. Ahora bien, el descenso de las nuevas infecciones observado en Liberia a finales de 2014 suscita una pregunta inesperada: ¿habrá el suficiente número de personas enfermas para saber si las vacunas funcionan?

Ninguno de los involucrados en la lucha contra el ébola querría ver más casos. Pero la realidad de la investigación de vacunas es que solo es posible saber si funcionan si se administran en situaciones en que el patógeno se halla en expansión. Si las tasas de infección descienden a niveles muy bajos, el estudio clínico que preveía vacunar a 27.000 ciudadanos de Liberia tendrá que ser ampliado, con el consiguiente incremento de coste, complejidad y tiempo para obtener respuestas.

Los organizadores confían en que no será necesario, explica Charles Link, director ejecutivo de NewLink Genetics, empresa biotecnológica de Iowa que está desarrollando la rVSV-ZEBOV



MIENTRAS EL MUNDO OBSERVA, manifestantes en Londres reclaman que el Gobierno británico redoble sus esfuerzos en la lucha contra el ébola.

AP PHOTO

en colaboración con el gigante farmacéutico Merck. El plan es repartir la vacuna en zonas de Liberia donde la tasa de infección supere la media. Nada en este proyecto de la vacuna contra el ébola es sencillo, asegura Link. «La complejidad supera todo lo conocido.»

La vacuna de NewLink ha sido diseñada por la Agencia de Salud Pública de Canadá. Está compuesta por un virus vivo modificado (virus de la estomatitis vesicular, o VSV) al que se ha acoplado la principal proteína de la superficie del virus del Ébola. El VSV afecta al ganado pero es inofensivo para los humanos; la vacuna causa una infección leve que desencadena la fabricación de anticuerpos dirigidos contra la proteína del ébola.

La segunda, cAd3-EBO, fue diseñada por científicos del NIAID, y GlaxoSmithKline adquirió en 2013 sus derechos tras comprar la especialista en vacunas suiza Okairos. Se trata de una vacuna inactivada (de virus muertos) a base de un adenovirus de chimpancé genéticamente modificado para presentar al sistema inmunitario proteínas de dos cepas de ébola.

Ambas vacunas experimentales tienen pros y contras. La de GlaxoSmithKline parte de una fase de ensayo más avanzada que la de NewLink. Pero la basada en VSV es más fácil de producir y a finales del pasado diciembre había muchas más dosis disponibles. En cuántas pautas completas se traducirán dependerá del número de tandas que los estudios preliminares indiquen como necesarias para generar altos niveles de anticuerpos.

Preocupa que la vacuna de GlaxoSmithKline no sea capaz de inmunizar con un solo pinchazo. La pauta de dos dosis —sobre

todo la que exige emplear distintas vacunas, una de primovacunación y otra de refuerzo— sería extraordinariamente difícil de cumplir, dado el estado en que se encuentra la red asistencial de los países afectados. Se espera que la vacuna de NewLink precise solo una dosis, pero podría causar efectos secundarios leves (fiebre moderada, escalofríos, dolor muscular y cefalea) que generarían confusión, porque ese es precisamente el cuadro clínico que anuncia la infección del ébola. En un mundo que se sirve de tales síntomas para detectar la infección, dificultaría aún más la distinción entre enfermos y sanos en la zona de la epidemia.

El estudio de Liberia ha sido diseñado para incluir tres grupos de participantes. Uno recibirá la vacuna de GlaxoSmithKline, otro la de NewLink y el tercero un placebo (quizás una vacuna antigripal o contra la hepatitis B). Varios científicos eminentes han denunciado en las páginas de *The Lancet* y en otros lugares que los ensayos comparativos con placebo no son éticos en semejantes circunstancias. Pero la Agencia de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA), encargada de autorizar cualquier fármaco empleado por las organizaciones sanitarias y militares del país, ha presionado para que se hagan tales estudios. «Necesitamos saber lo que es beneficioso y lo que es perjudicial en el menor tiempo y con la mayor seguridad posibles», afirma Luciana Borio, responsable de la respuesta contra el ébola de la FDA. «Este asunto repercutirá en las generaciones futuras y tenemos que hacerlo bien.»

Se ha perdido tanto tiempo en reconocer el alcance de la propagación del virus en África occidental que la epidemia ha acabado fragmentándose en docenas de minúsculos brotes

Jeremy Farrar, director de la fundación benéfica británica Wellcome Trust, que está financiando varios estudios de fármacos y vacunas, esperaba estrategias más innovadoras, como los ensayos que recurren a los diseños con administración secuencial (*step-wedge*) o con aleatorización por conglomerados, en los que todos los participantes reciben la vacuna activa. Así y todo, no ve del todo mal un estudio comparativo con placebo. «No me acaba de convencer. Pero tratándose de una vacuna que se administra a personas sanas, sin conocer bien ni su seguridad ni su eficacia, considero aceptable tanto un diseño con aleatorización por conglomerados o administración secuencial como un estudio comparativo con placebo.»

Entre tanto, en Sierra Leona se llevará a cabo un estudio con administración secuencial. El diseño aprovecha el hecho de que es imposible vacunar a todo el mundo a la vez para crear un grupo de control; compara la tasa de nuevas infecciones en las zonas donde ya se ha administrado la vacuna con la de otros lugares donde no se ha distribuido todavía. La ventaja radica en que todos acaban recibiendo la vacuna; el inconveniente es que se tarda más en saber si resulta eficaz.

Guinea también será el escenario de un estudio de algún tipo, aunque probablemente no tan ambicioso. La infraestructura del país es peor que la de sus vecinos, lo cual dificulta aún más la ejecución de los ensayos clínicos. Marie-Paule Kieny, responsable de la OMS que impulsa el esfuerzo internacional para desarrollar vacunas y fármacos contra el ébola, afirma que en el estudio guineano se vacunará a personal sanitario y consistirá en un ensayo observacional que no incluirá grupo de placebo. Asimismo, la Fundación Gates podría financiar un estudio para analizar la eficacia de la vacunación perifocal, en la que todas las personas próximas al enfermo son vacunadas para frenar el contagio. (Esta estrategia logró erradicar la viruela en el siglo pasado.)

Otras vacunas experimentales se hallan en diferentes fases de desarrollo. Algunas se consideran tan prometedoras como los productos de GlaxoSmithKline y NewLink. La concebida por Johnson & Johnson inició los estudios de seguridad a principios de enero. Pero las que van a la zaga de las vacunas de GlaxoSmithKline y NewLink se enfrentan a una dura realidad económica. En la carrera por derrotar a este virus mortal, el cuarto y quinto puestos probablemente no recibirán ningún reconocimiento. El futuro mercado para las vacunas contra el ébola será limitado. Con seguridad, la OMS o la Alianza Mundial para el Fomento de la Vacunación y la Inmunización almacenarán reservas para emplearlas en futuros brotes. Y algunos países prósperos también harán acopio de ella como protección contra actos de bioterrorismo. Pero el mercado no será mucho mayor. Así que, a menos que uno de los favoritos desfallezca, los que van a la zaga podrían quedar descartados.

La posibilidad de que la campaña de la vacuna fracase por entero siempre está presente en el pensamiento de los investigadores y del personal sanitario que lucha contra el virus. La epidemia ya no crece exponencialmente, como sucedió el pasado septiembre, pero sigue fuera de control. El número de casos nuevos ha descendido en gran parte de Liberia, pero la epidemia sigue desbocada en los distritos occidentales y septentrionales de Sierra Leona. Hasta que no se reduzca a cero el número de casos nuevos, el riesgo de repunte será bien real.

Miles de personas fallecieron en 2014. Y pese al esfuerzo tenaz de los profesionales de la salud, de los equipos de sepultureros y de los demás voluntarios, cientos y posiblemente miles engrosarán la lista en 2015. Pero, con su trabajo, el mundo tendrá en los próximos meses una idea más cabal de hasta dónde deberemos llegar, y con qué celeridad, para derrotar este virus ruin.

PARA SABER MÁS

Ebola: What you need to know. In-Depth Reports, ScientificAmerican.com, agosto de 2014.

Camouflage and misdirection: The full-on assault of Ebola virus disease. John Misasi y Nancy J. Sullivan en *Cell*, vol. 159, n.º 3, págs. 477-486, octubre de 2014. **www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674(14)01293-8.pdf**

Ebola situation reports from the World Health Organization: **http://who.int/csr/disease/ebola/situation-reports/en**

EN NUESTRO ARCHIVO

Los nuevos virus. Bernard Le Guenno en *IyC*, julio de 1995.

El auge incesante del ébola. Mark Fischetti en *IyC*, febrero de 2015.

INGENIERÍA MECÁNICA

El mundo progra

Materiales novedosos, impresoras 3D y una nueva forma de diseño podrían dar lugar a objetos que se montaran por sí mismos y cambiaran de forma o función según ciertas instrucciones

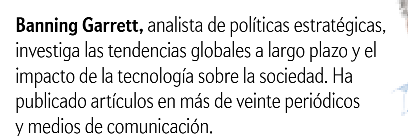
Thomas A. Campbell, Skylar Tibbits y Banning Garrett

mable



LOS OBJETOS «PROGRAMADOS», como esta hebra de polímero impresa en 3D que adopta la configuración de un cubo al sumergirse en agua, cambian de forma o entran en funcionamiento cuando se exponen a un estímulo.

Thomas A. Campbell es catedrático de investigación en el Instituto de Tecnología Esencial y Ciencia Aplicada del Instituto Politécnico de Virginia e investigador en el Consejo Atlántico.



Skylar Tibbits es director del Laboratorio de Autoensamblaje e investigador en el departamento de arquitectura del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Banning Garrett, analista de políticas estratégicas, investiga las tendencias globales a largo plazo y el impacto de la tecnología sobre la sociedad. Ha publicado artículos en más de veinte periódicos y medios de comunicación.



lgo tan sencillo como la fontanería podría marcar el inicio de un futuro con casas que se autoconstruyen o robots que cambian de forma. En la actualidad, cuando se desea construir la infraestructura para abastecer de agua a una ciudad, se emplean tuberías rígidas con capacidad fija que más tarde se entierran. El sistema funciona bastante bien hasta que se necesita aumentar el caudal en una zona o se rompe la tubería. En ese momento hay que desenterrar toda la instalación y sustituirla.

Una alternativa atractiva sería emplear tuberías flexibles que cambiaran de forma según las órdenes que reciban o de acuerdo con un determinado nivel de presión, o que las tuberías se reparasen por sí mismas en caso de rotura. Hoy en día, los avances en el diseño asistido por ordenador (CAD, en inglés) y en ciencia de materiales hacen que estas tuberías resulten factibles. Esos mismos avances y las nuevas formas de diseño que estos han generado podrían brindar un mundo de materiales programables, es decir, objetos que se autoensamblen, adquieran nuevas formas o cambien sus propiedades al dictado de determinadas órdenes.

Ya se están construyendo máquinas que se autoensamblan, pero se trata de dispositivos diminutos, de escala nanométrica, que operan como sensores bioquímicos, dispositivos electrónicos o sistemas que dispensan medicamentos. Nuestro interés se centra en lo que sucede cuando el material programable alcanza una escala perceptible por los humanos. Hay dos formas principales de lograr tal objetivo. Una estrategia implica la creación de elementos esenciales independientes que se unan o se separen autónomamente para formar estructuras programables de mayor tamaño. Otra posibilidad consiste en construir objetos que cambien de forma como una estructura única y completa. Serían objetos con bisagras, puntos de tensión mecánica o electrónica integrada solo en los lugares adecuados para permitir que variasen de forma según las circunstancias deseadas. A esta segunda estrategia la llamamos impresión en 4D. Al igual que la impresión en 3D, la 4D implica la elaboración de piezas mediante la superposición sucesiva de capas de material. En este caso, sin embargo, las piezas pueden cambiar de forma o propiedades a lo largo del tiempo después de su impresión.

El material programable podría dar lugar a objetos con el consiguiente ahorro de materiales, energía y mano de obra. Pensemos en una silla que pueda convertirse por sí sola en una mesa, o en esas tuberías flexibles que se autorreparan. Sería posible construir máquinas complejas sin intervención humana. Estos sistemas resultarían de especial utilidad en ambientes hostiles, como el espacio exterior. Se podría lanzar así una pequeña caja comprimida que cuando estuviese en órbita se configurase por sí misma en un satélite operativo. O cabría la opción de configurar otros dispositivos destinados al espacio para que realizasen múltiples tareas. De este modo, se podría hacer que un panel solar se transformase en una antena parabólica o en una cápsula de almacenamiento.

Pero el material programable también podría generar nuevos riesgos. Imaginemos un mundo material que pudiera ser pirateado. Sería posible sabotear alas deformables de avión, o bien dar órdenes para que los edificios se desmoronasen con gente en su interior. Los derechos de propiedad intelectual también adquirirían mayor complejidad cuando los productos comenzasen a alterar su forma, con lo que se crearían conflictos de patentes que ni por asomo ha considerado la Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos. La existencia de estos riesgos es la principal razón para comenzar en este momento el debate sobre esta tecnología potencialmente transformadora, de manera que se puedan elaborar soluciones, políticas y medidas de control desde un principio.

SIN NECESIDAD DE MONTAJE

Un puñado de científicos imaginativos llevan hablando sobre materiales programables desde principios de los años sesenta del siglo pasado. Pero este campo recibió un fuerte estímulo en 2007, cuando la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa (DARPA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos financió un proyecto de Materia Programable. La DARPA trazó

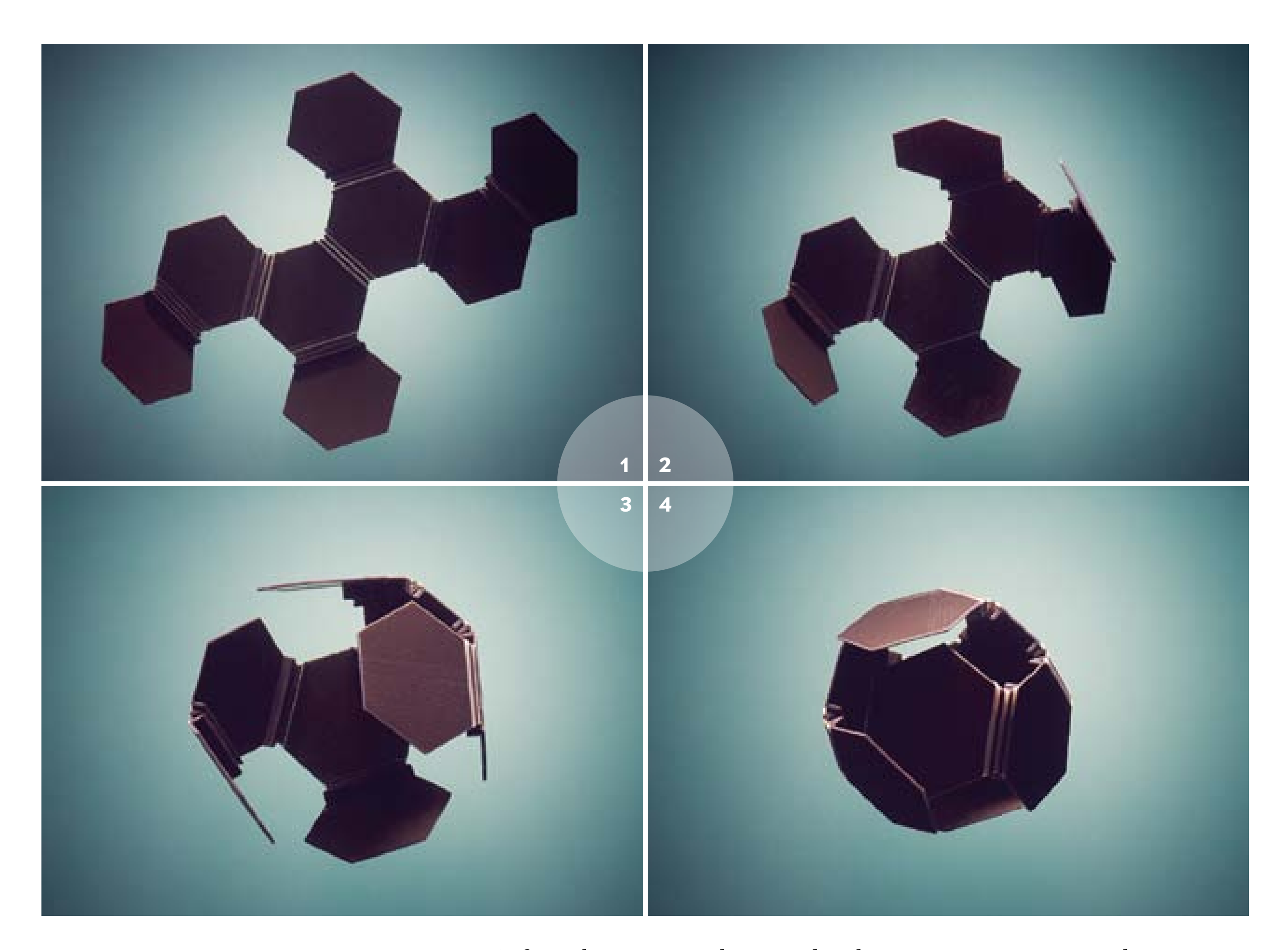
EN SÍNTESIS

La ciencia de materiales programables se centra en la ingeniería y el diseño de objetos que cambian de forma o función según el modo en que se ha programado.

La fabricación aditiva, o impresión en 3D, de material programable podría brindar robots que cambiaran de forma, satélites autodesplegables, y muebles, o incluso edificios, autoensamblables.

Pero los dispositivos fabricados de ese modo también podrían ser vulnerables a la piratería y al sabotaje. Además, los productos que se transformaran de un dispositivo a otro podrían suscitar importantes conflictos de propiedad intelectual.

TRAVIS RATHBONE (*fotografías*)



LOS DISPOSITIVOS AUTOPLEGABLES **están formados por materiales que, colocados en puntos previstos para el movimiento, se expanden o contraen cuando entran en contacto con calor, luz, electricidad u otros estímulos. Este octaedro autoensamblable (*arriba*) adopta su forma cuando se coloca en agua.**

un plan de varios años para el diseño y la construcción de estructuras robóticas a pequeña escala que pudieran transformarse en sistemas militares de mayor tamaño, como pantallas y antenas especializadas. Los investigadores redujeron la robótica a escala milimétrica hasta el tamaño aproximado de la anchura de un lápiz. Al cabo de unos años lograron realizar una demostración de robots diminutos con capacidad para cambiar de forma.

Uno de nosotros (Tibbits) se ha centrado en la manera de usar la impresión en 4D para construir esas máquinas sin mecanismos robóticos (motores, cables y electrónica). En el Laboratorio de Autoensamblaje (SAL, por sus siglas en inglés) del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), junto con sus colaboradores, ha fabricado, entre otras cosas, un objeto con forma de serpiente, elaborado con un polímero especial que se pliega para formar las siglas «MIT» cuando se introduce en agua; una hebra sencilla de polímero que se autotransforma desde esas siglas hasta el acrónimo «SAL» (en referencia al Laboratorio de Autoensamblaje); una superficie plana que se pliega por sí misma en un octaedro truncado; y un disco plano que, al exponerse al agua, adopta la forma de una estructura de papiroflexia con pliegues curvados.

Christopher B. Williams, del Instituto Politécnico de Virginia, ha incorporado cables de aleación y circuitos integrados en estructuras flexibles específicas mientras estas se imprimen. Cuando el proceso de impresión ha terminado, puede ordenarse una señal externa para provocar la activación de la estructura flexible, lo que cambia la forma del objeto. Esta estrategia tiene posibles aplicaciones en la robótica, el montaje de mobiliario y la construcción de edificios.

Williams y uno de nosotros (Campbell) han ido más lejos y han combinado la impresión en 4D con los nanomateriales. La inserción de estos en objetos impresos permite crear nanocompuestos de múltiples funciones que cambian sus propiedades en respuesta a ondas electromagnéticas (luz visible y ultravioleta). Los investigadores imprimieron un logotipo del Instituto Politécnico de Virginia con nanomateriales integrados que cambian de color según el tipo de iluminación. En un desarrollo posterior, estos materiales podrían llevar a una nueva clase de sensores que se integrarían en dispositivos médicos para comprobar valores extremos de presión sanguínea, niveles de insulina y otros parámetros médicos.

UN DESAFÍO INFORMÁTICO

Hoy en día resulta fácil imprimir un logotipo estático como «MIT» o «Virginia Tech» con tan solo enviar a una impresora 3D las instrucciones correspondientes al objeto que se desea obtener. Pero la impresión de piezas que más adelante puedan cambiar de forma implica el diseño de características progra-

mables, como puntos de tensión y flexión o nanomateriales integrados en el objeto. Esta clase de ingeniería plantea escabrosos desafíos informáticos que superan las capacidades de los actuales programas de CAD.

Consideremos la impresión de un objeto que se transforma de una mesa en una silla. Topológicamente, hay muchos modos de plegar una mesa y convertirla en una silla. No obstante, la mayoría de ellos no funcionará en el mundo real, porque en el proceso de plegado la pieza tropezará o se enredará consigo misma. El hallazgo de la mejor solución acarrea una tarea compleja de simulación. Los investigadores han desarrollado una biblioteca de mecanismos físicos que forman la base para cualquier objeto que deseemos diseñar. Son mecanismos para plegar, estirar, retorcer, reducir y realizar otras operaciones. La transformación de la pieza depende de la acción conjunta de estos elementos esenciales. Podemos diseñar objetos de forma lineal (*pliegue, pliegue, estirón*) o los podemos programar según una lógica (*si sucede esto, haz esto; si sucede aquello, haz aquello*).

La complejidad de estas combinaciones aumenta tan deprisa que es difícil predecir su comportamiento. Esta es la razón por la cual el desarrollo de nuevos tipos de programas de diseño es el primer paso para que el material programable se convierta en una realidad. Los diseñadores necesitan ordenadores para simular las transformaciones de los objetos impresos en 4D y para traducir sus diseños en instrucciones que sean comprendidas por una impresora. Necesitan un *software* que les ayude a evitar problemas difíciles de prever, como un objeto que se enreda consigo mismo cuando cambia de forma. Como primer paso para alcanzar este objetivo, el grupo de Tibbits trabajó con Autodesk, una empresa de *software* de diseño, para desarrollar el Proyecto Cyborg, que simula y optimiza la dinámica de objetos impresos en 4D. Sirviéndose de Cyborg, de una impresora 3D de materiales múltiples construida por la empresa Stratasys y de un nuevo polímero desarrollado por Stratasys que se expande un 150 por ciento cuando se sumerge en agua, el equipo creó el logotipo autoplegable del MIT y otros objetos impresos en 4D.

Hasta ahora la mayoría de los objetos diseñados con material programable han sido bastante simples; en ellos se ha empleado más o menos un tipo de unión y dos materiales. Pero ya existen materiales para construir dispositivos más complejos, y cuando crezca esa variedad, la única limitación vendrá impuesta por nuestra capacidad de procesamiento informático, nuestra imaginación y las leyes de la física.

ELEMENTOS ESENCIALES

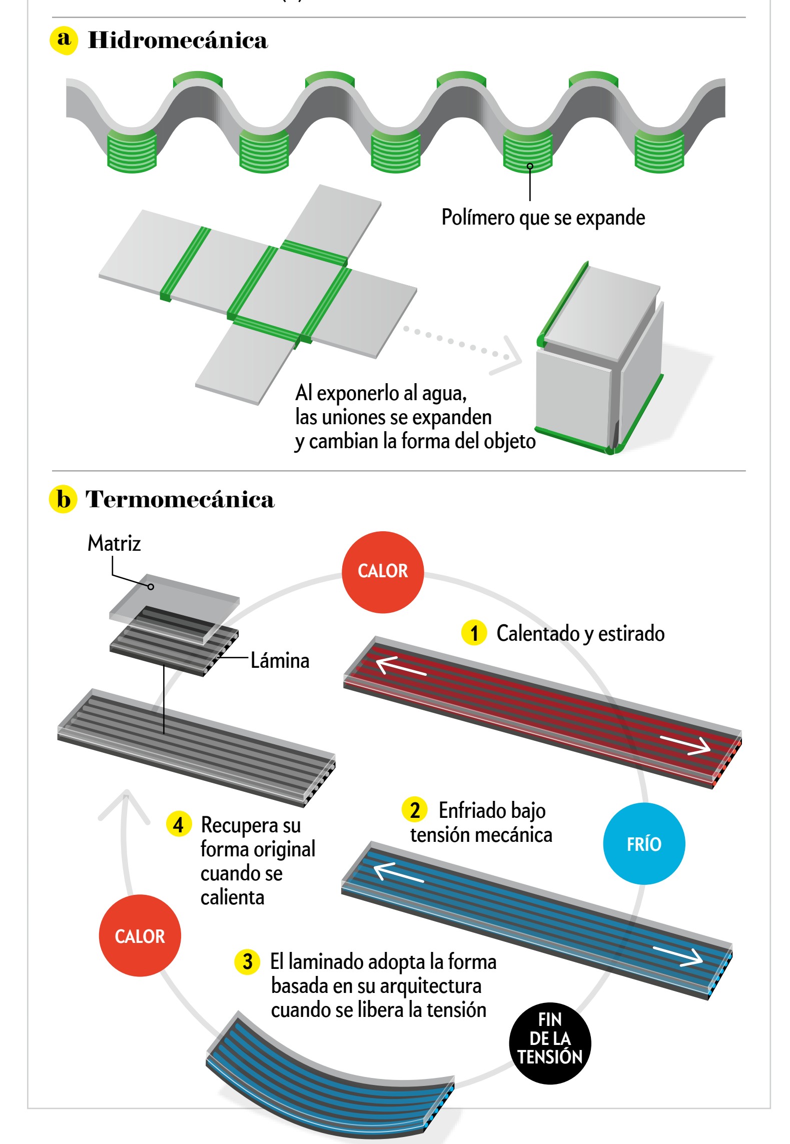
Una herramienta conceptual útil que debe considerarse en el material programable es el vóxel, o píxel volumétrico. En materiales programables, representa una unidad fundamental a partir de la cual se podrían construir dispositivos complejos. Podría corresponder a una partícula sintética de tamaño variable realizada en materiales como silicio, cerámica, plásticos o titanio. Se podrían diseñar vóxeles que se comportaran como un subsistema dentro de una amplia gama de posibilidades: un dispositivo de almacenamiento de energía, un actuador, un sensor, un conductor, un aislante, una cubierta protectora, una antena o incluso un microordenador. Los vóxeles podrían ensamblarse y, una vez unidos, programarse para que cambiaran de forma o función y juntos conformaran diferentes objetos.

En su reciente libro *Fabricated: The new world of 3D printing*, Hod Lipson y Melba Kurman usan vóxeles para trazar una analogía entre material programado y vida biológica. Después de todo, las proteínas en los seres vivos están compuestas por 22 elementos esenciales, los aminoácidos. «Si menos

CONCEPTOS BÁSICOS

Impresión en 4D

Hay más de un modo de programar materiales. Uno de los autores (Tibbits) ha usado impresoras 3D para crear objetos cuyos componentes están unidos por un polímero que se expande al exponerlo al agua (*a*). Esa expansión convierte una cinta plana en una estructura ondulante, o un grupo bidimensional de cuadrados en un cubo. H. Jerry Qi y Qi Ge, ambos antes en la Universidad de Colorado, y Martin L. Dunn, de la Universidad de Singapur de Tecnología y Diseño, han usado impresoras 3D para fabricar objetos de materiales múltiples que varían de forma cuando se calientan o se enfrían (*b*).



JOHN GRIMWADE (*ilustración*); FUENTE: «ACTIVE MATERIALS BY FOUR-DIMENSION PRINTING», QI GE, H. JERRY QI Y MARTIN L. DUNN EN *APPLIED PHYSICS LETTERS*, VOL. 103, N.º 13, 2013



LAS IMPRESORAS 3D, como la de material múltiple Objet500 Connex de Stratasys, permiten integrar en el momento de la fabricación polímeros que se expanden y otros materiales operativos.

CORTESÍA DEL LABORATORIO DE AUTOENSAMBLAJE DEL INSTITUO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS, STRATASYS, LTD., Y AUTODESK, INC.

de dos docenas de elementos son el origen de toda la vida, unos pocos tipos de vóxeles básicos también pueden dar lugar a una enorme variedad de posibilidades», escriben Lipson y Kurman. Podría haber vóxeles duros y blandos, vóxeles conductores para cableado, circuitos eléctricos compuestos de vóxeles que ejerzan funciones de resistencias, condensadores, inductancias y transistores. «Se añaden vóxeles actuadores y sensores», declaran, «y se obtiene un robot».

Los robots de ese tipo son de gran interés para las Fuerzas Armadas de Estados Unidos. El Ejército y la Marina de ese país ya están desarrollando modos de imprimir en 3D piezas de repuesto en barcos o en campaña, ya que dejar de transportar y almacenar miles de piezas de recambio permitiría ahorrar tiempo, dinero y espacio. El material programable podría ampliar estas ventajas. Imaginemos que se dispone de un contenedor con vóxeles en un submarino. Si se rompe una pieza o se necesita una herramienta específica, simplemente se toma un conjunto de vóxeles y se los programa para que conformen la herramienta. Cuando esta ya no se necesite, se da la orden de desmontaje, con lo que se dispondría de vóxeles para la fabricación de otras herramientas o piezas.

Además, el material programable podría proporcionar uniformes cuyo aislamiento y ventilación se adaptasen al ambiente que los rodea y a la biométrica del individuo. El año pasado, el Ejército de Estados Unidos invirtió casi un millón de dólares en un proyecto que emplearía la impresión en 4D para crear un camuflaje dinámico. Si se piensa a muy largo plazo y se usa la imaginación, es concebible que la técnica llegue a aplicarse en la fabricación de robots que puedan transformarse para rodear y atravesar obstáculos, de manera semejante al robot T-1000 de la película *Terminator 2*.

El material programable podría aprovecharse algún día en la construcción a gran escala, tanto en contextos civiles como militares. Pensemos en la posibilidad de edificios que se autoensamblen. En lugar de colocar ladrillos o verter hormigón, se introduciría en los cimientos un volumen de material programable del tamaño del edificio y, a continuación, se ordenaría a los elementos que «crecieran» o se «estabilizaran» en una estructura completa, provista de electricidad y fontanería. Ello podría parecer una complicación innecesaria para la construcción corriente de casas nuevas, pero en ambientes hostiles, como en una zona bélica o en la superficie de Marte, el autoensamblaje tiene un indudable atractivo.

EL FUTURO DEL AUTOENSAMBLAJE

Hemos mencionado solo algunas de las formas en que los investigadores de materiales programables podrían algún día desplegar sus inventos. ¿Qué decir de las alas de avión que se deformaran en repuesta a las variaciones de presión del aire o de temperatura? ¿O neumáticos cuya superficie de adherencia variase en función de las condiciones meteorológicas o del estado de las carreteras? Los materiales que se autorreparen contribuirían a la seguridad aeronáutica o permitirían que los puentes se adaptaran al tráfico intenso o incluso a un terremoto. ¿Y el mobiliario que se autoensamble? Cualquiera que haya ido de compras a Ikea apreciaría llevarse una cómoda empaquetada plana que se desplegara automáticamente para adquirir su forma.

Estos conceptos podrían parecer mágicos, pero se basan en genuinas investigaciones científicas y de ingeniería. No obstante, aún deben salvarse grandes obstáculos. Además de los desafíos informáticos que plantea, el material programable deberá extender los límites de la ciencia de materiales y la fabricación. Para crear esos logotipos fotosensibles del Instituto Politécnico de Virginia y los que se autodespliegan del MIT, se necesitan polímeros novedosos. ¿Qué tipos de nuevos materiales habrá que desarrollar para construir una casa que se autoensamble o un ala de avión transformable? Cuando hayamos creado los elementos esenciales correspondientes, aún nos enfrentaremos al reto de unirlos en objetos grandes y complejos. ¿Cómo haremos que los vóxeles se mantengan juntos? ¿Cómo deberíamos programarlos y qué tipo de energía podrían usar para autoensamblarse?

Suponiendo que logremos resolver estos problemas, aún nos enfrentaremos a otros obstáculos ya mencionados, como la exposición a la piratería y las complejas cuestiones de propiedad intelectual. Quizá tengamos pronto la oportunidad de superar estos desafíos. Durante los últimos dos años, Tibbits ha estado trabajando con varias empresas para desarrollar materiales, productos y sistemas de construcción que cambien de forma. Por su parte, Campbell y Williams han estado manteniendo conversaciones con una empresa para aplicar la impresión en 4D con nanomateriales como sistema de lucha contra las falsificaciones. Puede que la casa que se autoensamble no se halle tan lejos como parece.

PARA SABER MÁS

Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: Promises and challenges. Olga Ivanova et al en *Rapid Prototyping Journal*, vol. 19, n.º 5, págs. 353-364, 2013.

Fabricated: The new world of 3D printing. Hod Lipson y Melba Kurman. Wiley, 2013.

4D printing: Multi-material shape change. Skylar Tibbits en *Architectural Design*, vol. 84, n.º 1, págs. 116-121, enero/febrero de 2014.

The next wave: 4D printing: Programming the material world. Thomas A. Campbell, Skylar Tibbits y Banning Garrett. Atlantic Council, mayo de 2014. **www.atlanticcouncil.org/images/publications/The_Next_Wave_4D_Printing_Programming_the_Material_World.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

Nanotecnia de doble hélice. Nadrian C. Seeman en *IyC*, agosto de 2004.

Materiales de reparación autónoma. Scott R. White, Benjamin J. Blaiszik y Nancy R. Sottos en *IyC*, mayo de 2012.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto para Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

La geometría de las redes fluviales

El aspecto fractal de las redes de afluentes y otros sistemas obedece a un principio físico simple: la minimización de las «pérdidas» de energía por unidad de tiempo

El concepto de autosemejanza ha llegado lejos. Primero manejado entre científicos, es hoy relativamente conocido entre el público general. Tal vez no debería sorprendernos. A fin de cuentas, la autosemejanza no solo aparece en contextos matemáticos; también se manifiesta en el sistema circulatorio, las descargas de rayos, las hojas de helecho, las líneas de costa o las ramas y raíces de los árboles. Sin embargo, a veces pasamos por alto algo importante: que, más que una característica misteriosa inherente a algunos sistemas naturales, la autosemejanza constituye una manifestación visible de su funcionamiento.

Un ejemplo lo hallamos en las redes de afluentes formadas por pequeños ríos. Aunque el recorrido de los riachuelos queda determinado en su mayor parte por el azar, las redes de este tipo se parecen tanto entre sí que pueden llegar a confundirse. Una parte de la red se asemeja al sistema completo tanto como a otra zona de la red. Los sistemas fluviales no solo guardan similitudes entre sí, sino que también se parecen a los sistemas circulatorios y los radiculares, entre otros. Pero ¿hasta qué punto debería sorprendernos todo esto?

Equilibrio y energía

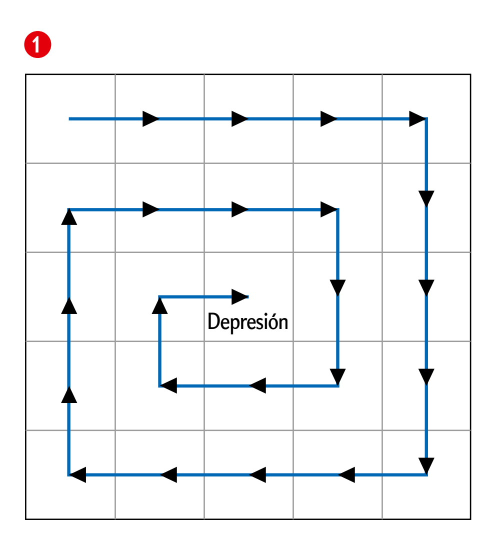
En un supuesto ideal, un sistema fluvial no acumula materia ni energía neta: por unidad de tiempo, absorbe del entorno tanta como la que devuelve a él. Tales situaciones estacionarias reciben el nombre de equilibrios dinámicos. Con todo, el sistema sí «consume» energía, en el sentido de que la gana en forma de materia y energía mecánica útil, pero la cede al entorno transformada en calor. Visto así, la energía se disipa, ya que se «pierde» para el uso futuro.

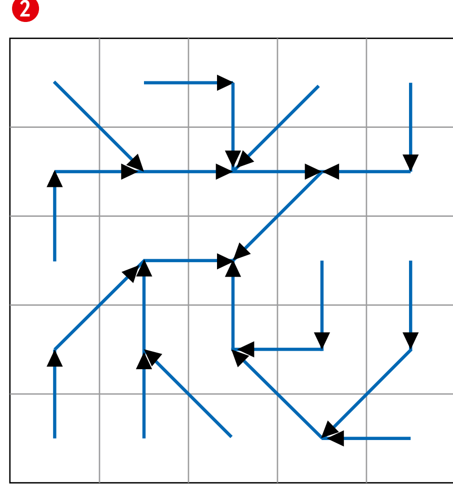
¿Por qué esa clase de equilibrios genera tan menudo formas y estructuras autosemejantes? Tal y como mostró Ilya Prigogine, galardonado en 1977 con el Nobel de química, todos esos sistemas de fluidos en equilibrio guardan algo en común: disipan un mínimo de energía por unidad de tiempo. La idea tal vez suene abstracta, pero puede ilustrarse de manera concreta y paso a paso.

Para ello, hemos de comenzar por aclarar de qué magnitudes depende la disipación de la energía en, por ejemplo, una superficie inclinada sobre la que cae la lluvia. A causa de la fricción del agua sobre la superficie, la energía disipada aumentará con la distancia recorrida por el fluido. Además, también lo hará con la superficie de rozamiento. Por otro lado, cuanta más agua lleve el cauce, menor será la disipación por unidad de masa transportada. A mayor volumen, la superficie de contacto resultará proporcionalmente menor y, con ella, también el rozamiento.

A la vista de lo anterior, la energía disipada disminuye cuando varias corrientes menores se funden en otra de mayor tamaño. Sin embargo, este proceso se ve limitado por el hecho de que las corrientes se drenan mutuamente el fluido; es decir, la disipación de energía en una de ellas solo se reduce a costa de aumentar las de otras. Por último, ninguno de los cauces acabará secándose nunca por completo, ya que la lluvia cae de manera uniforme en todos ellos.

Hasta que una red alcanza la configuración óptima en lo que se refiere a la disipación de energía, pasa por un proceso en el





EL AGUA QUE CAE sobre una superficie cuadrada de cinco celdas de lado y con una depresión en el centro puede fluir de diferentes formas. Aquí se muestran dos ejemplos (*izquierda*). ¿Qué variante resulta más favorable energéticamente? Para calcularlo, hemos de obtener primero la disipación p_i en cada celda, la cual se obtiene multiplicando el caudal correspondiente, Q_i (medido en número de gotas), por el recorrido de cada tramo, l_i (*derecha*). En la matriz de caudales, 2a, las entradas se obtienen a partir de

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN EL AUTOR

que, a partir de una configuración inicial, va probando poco a poco las diferentes posibilidades. Las opciones que se ajustan a los principios de Prigogine resultan más favorables energéticamente que otras, por lo que «sobreviven» durante más tiempo. Al final, se establece un sistema que fluctúa en torno a su estado ideal.

Un ejemplo sencillo

Un modelo simple nos lo proporciona una red cuadrada de cinco celdas de lado con una depresión en el centro (*véanse las figuras*). Si llueve sobre ella, el agua tenderá a fluir hacia la depresión central. Consideremos que, por unidad de tiempo, sobre cada elemento de superficie i cae una gota de agua, lo que abastece a la red de materia y energía. Por otro lado, podemos suponer que la energía disipada cuando el agua fluye por el elemento de superficie i (la tasa de disipación, P_i) resulta proporcional a la longitud l_i recorrida hasta el elemento vecino, a la pendiente s_i y al número de las gotas que fluyen por unidad de tiempo, Q_i.

La descripción anterior puede simplificarse, ya que empíricamente se observa que s_i resulta inversamente proporcional a la raíz de Q_i. Por tanto, el producto s_iQ_i puede reemplazarse por $\sqrt{Q_i}$. De esta manera, para cada elemento de superficie i obtenemos que la tasa de disipación P_i viene dada por:

$$P_i = \alpha \cdot \sqrt{Q_i}\, l_i .$$

Para nuestros propósitos, el valor absoluto de esta cantidad es irrelevante, por lo que podemos obviar el coeficiente de proporcionalidad y fijarnos únicamente en la magnitud reducida:

$$p_i = P_i/\alpha = \sqrt{Q_i}\, l_i .$$

Para simplificar, supongamos que la arista de nuestras celdas vale 1. De esta manera, la longitud l_i solo podrá tomar los valores 1 o $\sqrt{2}$, dependiendo de si el agua fluye hacia una casilla lateral o hacia su vecina situada en la diagonal, respectivamente. Así, para calcular p_i basta con multiplicar una de esas cantidades por el número de gotas que han pasado por la celda en cuestión. Por último, la disipación total, p, se obtiene al sumar todos los valores individuales p_i.

Consideremos ahora dos ejemplos concretos. En el primero de ellos (*figura 1*) el agua fluye en espiral y atraviesa todas las casillas hasta acabar en la depresión central. Como veremos, este camino supone una tasa de disipación muy elevada. El segundo (*figura 2*), sin embargo, se acerca más a una situación real. Las gotas que



LAS REDES FLUVIALES deben su geometría fractal a la optimización del proceso de disipación de energía. En la imagen, la red de afluentes del Amazonas (*azul; los demás colores indican la altitud*).

OBSERVATORIO DE LA TIERRA DE LA NASA, JESSE ALLEN; INSTALACIONES DE COBERTURA GLOBAL DEL SUELO, UNIVERSIDAD DE MARYLAND; PROYECTO HYDROSHEDS, FONDO MUNDIAL PARA LA NATURALEZA (*mapa*); *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*, SEGÚN EL AUTOR (*datos del retículo*)

las gotas que caen sobre cada casilla por unidad de tiempo y las que fluyen desde las celdas vecinas. En la depresión central se almacenan las 25 gotas que han caído sobre la red. En la matriz de longitudes, 2b, las entradas indican el recorrido libre medio que sigue una gota desde una casilla hasta la siguiente. La separación entre los puntos medios de dos celdas contiguas en dirección horizontal o vertical se ha tomado igual a 1, lo que implica que los trayectos en diagonal tienen una longitud de $\sqrt{2}$.

2a Caudales Q_i

1	1	2	1	1
2	4	8	11	2
1	6	25	1	1
2	3	7	2	2
1	1	1	4	1

2b Recorridos libres medios (l_i)

$\sqrt{2}$	1	1	$\sqrt{2}$	1
1	1	1	$\sqrt{2}$	1
1	1	0	1	1
$\sqrt{2}$	1	1	1	$\sqrt{2}$
1	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	1

proceden de la zona más externa se juntan, evitan rodeos y tienden a dirigirse hacia el centro. Que esta variante resulta más favorable desde el punto de vista energético es algo que podemos verificar mediante el cálculo correspondiente. Los valores para la cantidad Q_i de gotas que fluyen por la casilla i y la longitud l_i recorrida hasta la celda siguiente pueden obtenerse con facilidad (*figuras 2a y 2b*).

Si sumamos ahora el producto $\sqrt{Q_i}\,l_i$ para todas las casillas, obtenemos:

$$p = \sqrt{1}\cdot\sqrt{2} + \sqrt{1}\cdot 1 + \sqrt{2}\cdot 1 + \sqrt{1}\cdot\sqrt{2} + \sqrt{1}\cdot 1 + \sqrt{2}\cdot 1 + \sqrt{4}\cdot 1 + \sqrt{8}\cdot 1 + \sqrt{11}\cdot\sqrt{2} + \sqrt{2}\cdot 1 + \sqrt{1}\cdot 1 + \sqrt{6}\cdot 1 + \sqrt{25}\cdot 0 + \sqrt{1}\cdot 1 + \sqrt{1}\cdot 1 + \sqrt{2}\cdot\sqrt{2} + \sqrt{3}\cdot 1 + \sqrt{7}\cdot 1 + \sqrt{2}\cdot 1 + \sqrt{2}\cdot\sqrt{2} + \sqrt{1}\cdot 1 + \sqrt{1}\cdot 1 + \sqrt{1}\cdot\sqrt{2} + \sqrt{4}\cdot\sqrt{2} + \sqrt{1}\cdot 1 \approx 41{,}07$$

Si llevamos a cabo el mismo cálculo para el recorrido en espiral, veremos que el resultado casi dobla el del caso anterior: 80,63. Como podía esperarse, la variante que a priori parecía más natural resulta ser la más idónea desde un punto de vista energético.

Evolución de la red

Dejemos ahora que el sistema se autorregule. No importa cuál sea la configuración inicial: según Prigogine, la red tenderá a alcanzar un estado de mínima disipación de energía. Ello se debe a que, con el paso del tiempo, los obstáculos del terreno, como los guijarros en el curso de un torrente, provocarán que este se bifurque. En caso de que las nuevas ramificaciones resulten más favorables que las anteriores desde el punto de vista energético, se tornarán más resistentes ante posibles perturbaciones y sobrevivirán durante más tiempo. Al final, la red alcanzará su configuración ideal.

En nuestro modelo de 25 celdas podemos llevar a cabo «experimentos» de manera más o menos razonable. En el caso de superficies mayores necesitaremos un ordenador. Puede comprobarse que, ya en una simulación con 200 × 200 celdas, el resultado se asemeja bastante a las redes fluviales del mundo real.

Para ello solo hemos de tomar en consideración algunos detalles. Dada una estructura cualquiera, debemos procurar que haya perturbaciones; es decir, que a los tramos se les permita variar de manera aleatoria. Además, el programa ha de ser flexible: aunque sea de manera temporal, debe permitirnos caminos de desagüe óptimos localmente aunque no



SIMULACIÓN POR ORDENADOR de una red fluvial en un retículo de 200 × 200 celdas. Cada tramo de río ha sido representado con un grosor proporcional al caudal que transporta. El punto de desagüe se encuentra en el centro.

lo sean desde un punto de vista global. Con ello se busca permitir que el sistema alcance un estado aún más favorable en la siguiente iteración. Por último, la simulación de nuestra red fluvial cobrará un aspecto más realista si representamos con un grosor mayor aquellos tramos que transportan más agua (en la naturaleza, el caudal de un río aumenta con el ancho del cauce).

Así pues, la estructura aparentemente compleja de las redes de fluidos puede derivarse a partir de un principio simple. Y este, a su vez, puede reducirse a otro más básico aún: la tendencia de todo sistema a alcanzar un equilibrio termodinámico; es decir, un estado de máxima entropía. La energía útil tiende a transformarse en calor, el cual se disipa por el espacio de modo uniforme. Dado que nuestro sistema no puede alcanzar dicho estado, pues recibe constantemente nueva materia y energía, se conforma con la segunda mejor opción: lograr un equilibrio de flujo y acercarse así lo máximo posible al equilibrio termodinámico.

PARA SABER MÁS

Minimum energy dissipation model for river basin geometry. T. Sun et al. en *Physical Review*, vol. E49, págs. 4865-4872, 1994.

Thermodynamik und Strukturbildung am Beispiel der Entstehung eines Flussnetzwerkes. H. J. Schlichtig y V. Nordmeier en *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, vol. 53, n.º 8, págs. 450-454, 2000.

CORTESÍA DEL AUTOR

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



Un modelo no estándar

Cómo recuperar el cálculo diferencial a partir de elementos hiperreales

En columnas anteriores hemos hablado de los modelos no estándar de la aritmética [*véase* «Limitaciones expresivas»; Investigación y Ciencia, enero de 2014] y del análisis real [*véase* «Eventos posibles de probabilidad cero»; Investigación y Ciencia, abril de 2013]. Tales modelos pueden entenderse como «representaciones alternativas» de las reglas usuales de la aritmética y el cálculo: aunque contienen elementos que satisfacen todas las propiedades que solemos asociar a los números naturales o reales, dichos elementos no pertenecen a esos conjuntos.

En esta columna exploraremos uno de los modelos no estándar mejor estudiados en la teoría del análisis real. Estos modelos presentan la curiosa propiedad de que, si bien obedecen los mismos principios que $\mathbb{R}$ (siempre y cuando puedan formularse en un lenguaje de primer orden), contienen elementos concretos que, en un sentido preciso, son infinitamente pequeños o infinitamente grandes.

Antes, sin embargo, hemos de introducir otros personajes.

Filtros y ultrafiltros

Consideremos un conjunto X. Si F denota una colección de subconjuntos de X, diremos que F es un *filtro en X* si y solo si satisface las siguientes condiciones:

- X es miembro de F.
- Si A y B son miembros de F, entonces su intersección, $A \cap B$, también pertenece a F.
- Si A es miembro de F y $A \subseteq C$ (con $C \subseteq X$), entonces C es miembro de F.

De manera intuitiva, podemos pensar en un filtro como en un objeto que, al igual que un colador, nos permite extraer ciertos subconjuntos de X.

A modo de ejemplo, consideremos el conjunto de los números naturales, $\mathbb{N}$, y definamos:

$$F^* = \{A \subseteq \mathbb{N} : \mathbb{N}\backslash A \text{ es finito}\}$$

(donde $\mathbb{N}\backslash A$ denota el complemento de A en $\mathbb{N}$; es decir, el conjunto formado por todos los números naturales que no pertenecen a A). De la definición, vemos que F^* corresponde a un conjunto formado por cierta clase de subconjuntos de $\mathbb{N}$ que contienen un número infinito de elementos (en concreto, todos aquellos cuyo complemento es finito).

Podemos comprobar que F^* es un filtro en $\mathbb{N}$. En primer lugar, $\mathbb{N}$ pertenece a F^*, ya que el complemento de los números naturales es el conjunto vacío, el cual contiene un número finito de elementos (a saber, cero).

Por otro lado, si A y B están en F^*, podemos ver que lo mismo ocurre con su intersección. En general, $X\backslash(A\cap B) = (X\backslash A) \cup (X\backslash B)$ (el complemento de la intersección es la unión de los complementos). Y si A y B son miembros de F^*, entonces $\mathbb{N}\backslash A$ y $\mathbb{N}\backslash B$ contienen un número finito de elementos, así que lo mismo sucede con $(\mathbb{N}\backslash A) \cup (\mathbb{N}\backslash B) = \mathbb{N}\backslash(A\cap B)$.

Por último, si A es un miembro de F^* y $A \subseteq C$, entonces $\mathbb{N}\backslash C$ ha de tener un número finito de elementos, ya que $\mathbb{N}\backslash C \subseteq \mathbb{N}\backslash A$ (en general, si $A \subseteq C \subseteq X$, entonces $X\backslash C \subseteq X\backslash A$). Por tanto, C es miembro de F.

Podemos definir otros ejemplos. Resulta sencillo verificar que, si Z es un conjunto no vacío de $\mathbb{N}$, entonces el conjunto formado por todos los conjuntos que contienen a Z:

$$F_Z = \{A \subseteq \mathbb{N} : Z \subseteq A\}$$

es un filtro. Claramente, F_Z contiene a $\mathbb{N}$. Y si A y B son miembros de F_Z, entonces $Z \subseteq A \cap B$, por lo que $A \cap B$ también pertenece a F_Z. Además, si A es miembro de F_Z y $A \subseteq C$, entonces $Z \subseteq C$, por lo que también C es un miembro de F_Z.

Por otro lado, llamamos *ultrafiltro* a un filtro U que es máximo en el siguiente sentido: para todo filtro F, si $U \subseteq F$, entonces $U = F$. Puede demostrarse que un filtro U en X es máximo si y solo si para todo subconjunto $A \subseteq X$, o bien A está en U, o bien $X\backslash A$ está en U. (El filtro F^* no es un ultrafiltro, ya que no contiene al conjunto de los números pares ni al de los impares.)

Si n denota un número natural cualquiera, el conjunto formado por todos los conjuntos que contienen a n:

$$U_n = \{A \subseteq \mathbb{N} : n \in A\}$$

es un ultrafiltro. Para ver por qué, notemos primero que $U_n = F_Z$ para el caso particular de $Z = \{n\}$, por lo que sabemos que es un filtro. Por otro lado, para todo subconjunto A de $\mathbb{N}$, o bien $n \in A$, o bien $n \in \mathbb{N}\backslash A$. Por lo tanto, U_n es máximo.

Por último, diremos que un ultrafiltro U en X es *principal* si se ajusta a la definición anterior; es decir, si existe algún elemento $x \in X$ tal que U puede escribirse como $U_x = \{A \subseteq X : x \in A\}$. Notemos que un ultrafiltro principal incluye conjuntos de todos los tamaños posibles, pues contiene un conjunto de un solo elemento, $\{x\}$, así como todos aquellos que, a su vez, contienen a x.

Sin embargo, existen también ultrafiltros no principales. Supongamos que construimos un ultrafiltro U^* que contiene a F^*. Resulta inmediato ver que, para todo número natural n, $\mathbb{N}\backslash\{n\}$ pertenece a U^* (puesto que pertenece a F^*) y, por ende, $U^* \neq U_n$. La existencia de ultrafiltros no principales queda garantizada porque, en general, puede demostrarse que, para todo filtro F, existe siempre algún ultrafiltro U que contiene a F.

En el caso de los números naturales, un ultrafiltro no principal corresponde a los subconjuntos «grandes» de $\mathbb{N}$. De manera intuitiva, podemos ver que el conjunto de todos los subconjuntos «grandes» de $\mathbb{N}$ es un filtro: $\mathbb{N}$ es un subconjunto grande de $\mathbb{N}$; la intersección de dos subconjuntos grandes es grande; y si un conjunto grande está contenido en otro, este último solo puede ser grande. Además, se trata de un ultrafiltro, ya que si un sub-

conjunto dado no es grande, entonces ha de serlo su complemento. Por último, no resulta difícil convencerse de que el conjunto de todos los subconjuntos grandes de $\mathbb{N}$ ha de contener a F^*.

Más allá de la recta real

Los elementos anteriores nos proporcionan la base necesaria para construir un modelo no estándar del análisis real. Para ello, consideremos primero el conjunto de todas las funciones que van de $\mathbb{N}$ a $\mathbb{R}$; es decir, aquellas funciones s que toman como entrada un número natural n y producen uno real: $s(n) \in \mathbb{R}$. Llamemos $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ a dicho conjunto.

Dadas dos funciones s y t, podemos definir entre ellas las mismas operaciones que estamos acostumbrados a efectuar con los números reales. Por ejemplo, podemos construir la función suma, '$s + t$', como aquella que envía cada $n \in \mathbb{N}$ al número $s(n) + t(n)$. De manera análoga, cabe definir la función producto, '$s \times t$'. Por último, para cada número real $r \in R$, llamaremos $\tilde{r}$ a la función constante cuya imagen es siempre r; es decir, para todo $n \in \mathbb{N}$, $\tilde{r}\ (n) = r$.

Fijemos ahora un ultrafiltro U no principal en $\mathbb{N}$. Si s y t pertenecen a $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$, diremos que ambas son *equivalentes*, $s \sim t$, si y solo si:

$$\{i \in \mathbb{N} : s(i) = t(i)\} \in U \,.$$

Dicho de otro modo, dos miembros de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ son equivalentes si coinciden en un conjunto «grande» de argumentos.

La relación $\sim$ constituye una relación de equivalencia en el sentido siguiente:

- Para todo s, $s \sim s$.
- Si $s \sim t$, entonces $t \sim s$.
- Si $s \sim t$ y $t \sim u$, entonces $s \sim u$.

La única propiedad que no se sigue inmediatamente de la definición es la tercera. Sin embargo, resulta sencillo verificar que debe cumplirse. Dado que $\{i \in \mathbb{N} : s(i) = t(i)\}$ y $\{i \in \mathbb{N} : t(i) = u(i)\}$ son miembros de U, tenemos que:

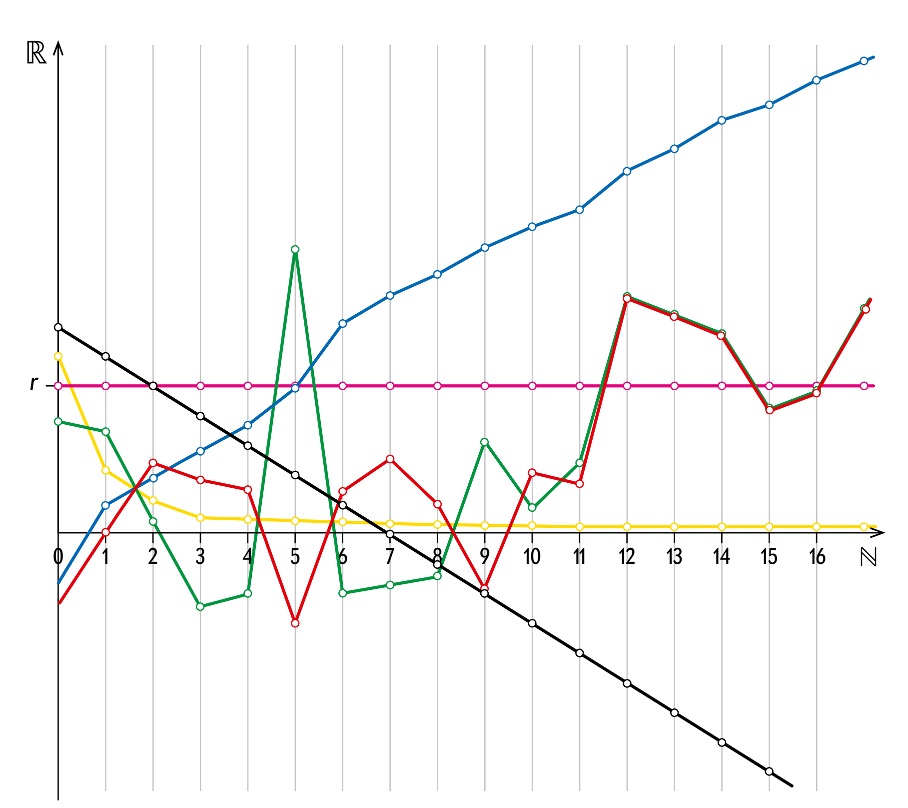
$$\{i{\in}\mathbb{N} : s(i){=}t(i)\} \cap \{i{\in}\mathbb{N} : t(i){=}u(i)\} \subseteq U \,.$$

Y puesto que:

$$\{i{\in}\mathbb{N} : s(i){=}t(i)\} \cap \{i{\in}\mathbb{N} : t(i){=}u(i)\} \subseteq \{i{\in}\mathbb{N} : s(i){=}u(i)\} \,,$$

la tercera condición de filtro implica que $\{i \in \mathbb{N} : s(i) = u(i)\} \subseteq U$.

Ahora, dada una función s, llamaremos $[s]$ al conjunto de todas las funciones de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ que son equivalentes a s. Estas colecciones de elementos equivalentes entre sí reciben el nombre de *clases de equivalencia*.



NÚMEROS HIPERREALES: **Para construir un modelo no estándar del análisis real, basta con considerar clases de equivalencia en el conjunto de las funciones que van de $\mathbb{N}$ a $\mathbb{R}$. Tales funciones pueden representarse en un plano (*figura*). La línea fucsia corresponde a la función constante $\tilde{r}\,(n) = r$, donde r denota un número real positivo. Las gráficas verde y roja representan dos funciones equivalentes, pues coinciden en un conjunto «grande» de argumentos. La línea amarilla, que indica una función estrictamente decreciente pero siempre positiva, es un representante de un elemento infinitesimal positivo, $[\eta]$. Estos elementos satisfacen $\tilde{0} < [\eta] < [\tilde{r}]$ para todo número real positivo r. La línea azul, que corresponde a una función divergente, es un representante de un elemento hiperreal infinito positivo; la negra, de uno infinito negativo.**

Todas las clases de equivalencia forman, a su vez, un conjunto:

$$^*\mathbb{R} = \{[t] : t \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}\} \,.$$

Podemos entender $^*\mathbb{R}$ como una «versión» de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ en la que hemos eliminado la redundancia: de todas las funciones que son equivalentes entre sí, nos quedamos con un único representante. Notemos que cada miembro de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ pertenece a uno y solo uno de los elementos de $^*\mathbb{R}$.

El conjunto $^*\mathbb{R}$ proporciona un modelo no estándar del análisis real. En primer lugar, podemos definir la suma de dos clases de equivalencia como:

$$[s] + [t] = [s + t] \,.$$

Es decir, tomamos un representante de cada clase, los sumamos y construimos la clase de equivalencia de la función suma. De manera análoga podemos definir el producto:

$$[s] \times [t] = [s \times t] \,.$$

Estas operaciones satisfacen todas las propiedades a las que estamos acostumbrados. Por ejemplo, podemos ver que todo elemento $[s]$ tiene un único inverso bajo $+$; es decir, un elemento $[t]$ que satisface:

$$[s] + [t] = [\tilde{0}] \,.$$

Para ello, basta con tomar $t = -\tilde{1} \times s$. Y si llamamos '$-[u]$' al inverso de $[u]$ bajo $+$, la resta queda definida como:

$$[s] - [u] = [s] + (-[u]) \,.$$

De igual modo, todo elemento $[s] \neq [\tilde{0}]$ tiene un único inverso $[t]$ bajo $\times$; es decir, un elemento tal que:

$$[s] \times [t] = [\tilde{1}] \,.$$



Para ver por qué, dado un representante s de $[s] \neq [\tilde{0}]$, definamos la función t de la siguiente manera:

$$t(n) = s(n)^{-1} \quad \text{si } s(n) \neq 0\,,$$
$$t(n) = s(n) \quad \text{si } s(n) = 0\,.$$

(Nótese que, si bien $[s] \neq [\tilde{0}]$, eso no garantiza que no existan números concretos n tales que $s(n) = 0$.)

Que $[s] \neq [\tilde{0}]$ quiere decir que el conjunto $\{i : s(i) = 0\}$ no pertenece a U. Por tanto, su complemento, $\{i : s(i) \neq 0\}$, ha de ser un miembro de U. Eso implica que $\{i : t(i) \times s(i) = 1\} \in U$, de lo que se sigue que $[s] \times [t] = [\tilde{1}]$. Llamaremos $[s]^{-1}$ al único inverso multiplicativo de $[s]$.

Resulta posible definir operaciones análogas a todas las que conocemos. Y, con un poco de paciencia, podremos demostrar que dichas operaciones satisfacen las propiedades habituales: la suma y el producto son conmutativos, el producto sobre la suma es distributivo, etcétera.

Además, para todo número real r, podemos pensar en el elemento $[\tilde{r}]$ como en su representante en $^*\mathbb{R}$. Todas las propiedades usuales de r se traducen en los atributos correspondientes en $^*\mathbb{R}$. Por ejemplo, resulta posible definir una noción de «racionalidad» en $^*\mathbb{R}$ según la cual $[\tilde{0}]$ es un elemento racional, pero $[\tilde{\pi}]$ no.

Infinitesimales e infinitos

Ahora podemos intentar ordenar nuestros nuevos elementos. Para ello, dados $[s]$ y $[t]$, diremos que $[s] < [t]$ si y solo si:

$$\{i : s(i) < t(i)\} \in U\,.$$

La relación '<' constituye una relación de orden sobre $^*\mathbb{R}$, la cual satisface buena parte de las propiedades del orden usual sobre los números reales. Por ejemplo, si $[s] < [t]$, $[\tilde{0}] < [s]$ y $[\tilde{0}] < [t]$, entonces $[t]^{-1} < [s]^{-1}$. Además, dados dos números reales x e y, $x < y$ si y solo si $[\tilde{x}] < [\tilde{y}]$.

Sin embargo, en $^*\mathbb{R}$ existen *infinitesimales positivos*: elementos $[\eta]$ tales que $[\tilde{0}] < [\eta]$ y que, además, para todo $n \in \mathbb{N}$:

$$[\eta] < [\tilde{n}]^{-1}\,.$$

Si $[\eta]$ es un infinitesimal positivo, entonces $([\tilde{n}]^{-1})^{-1} = [\tilde{n}] < [\eta]^{-1}$ para todo número natural n. Por esa razón, decimos que $[\eta]^{-1}$ es un *infinito positivo*. Existen asimismo infinitesimales e infinitos negativos.

Los elementos pertenecientes a estas categorías reciben el nombre de *hiperreales*. En concreto, cada miembro de $^*\mathbb{R}$ diferente de $[\tilde{r}]$ para algún $r \in \mathbb{R}$ es un elemento hiperreal.

Estamos acostumbrados a pensar en los infinitesimales como en una herramienta que no corresponde a ningún objeto concreto. Sin embargo, en este universo existen infinitesimales tan concretos como cualquier número real (o, al menos, como cualquiera de los objetos que corresponden a los números reales).

Podemos definir varios miembros hiperreales de manera explícita. Por ejemplo, consideremos la función:

$$\omega(n) = n\,.$$

Podemos verificar que $[\omega]$ es un hiperreal infinito positivo. Para verlo, comencemos por recordar que, dado un número real r, siempre existe algún número natural n_r tal que $r < n_r$. Y, puesto que U contiene a F^*, el conjunto $\{i : n_r < i\} \in U$. Ello implica que $\{i : r < \omega(i)\} \in U$ y, por tanto, que $[\tilde{r}] < [\omega]$... ¡para cualquier elemento $[\tilde{r}]$!

Dado que todo elemento de $^*\mathbb{R}$ distinto de $[\tilde{0}]$ tiene un inverso multiplicativo, sabemos que existe $[\eta] = [\omega]^{-1}$. Y como $[\tilde{r}] < [\omega]$ para todo real positivo, entonces $[\tilde{0}] < [\eta] < [\tilde{r}]$ para todo número r positivo.

Los elementos infinitesimales son, en un sentido preciso, infinitamente pequeños: si $[\eta]$ es un infinitesimal, entonces, para todo número real r, $[\eta] \times [\tilde{r}]$ es también infinitesimal.

En $^*\mathbb{R}$ podemos definir todas las nociones usuales del cálculo, como continuidad, derivada, etcétera, sin necesidad de recurrir a los célebres ε y δ que nos enseñaron a utilizar en la escuela. Por ejemplo, una función real f es continua si y solo si, para todos los $[s]$ y $[t] \in {}^*\mathbb{R}$ tales que su diferencia es infinitesimal, la diferencia entre $[f(s)]$ y $[f(t)]$ es también infinitesimal (donde $f(s)(x) = f(s(x))$).

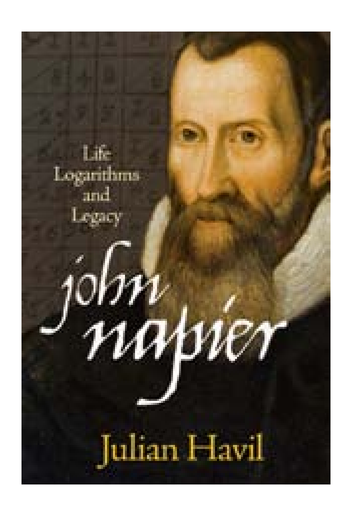
Aunque la definición de continuidad en términos de ε y δ supuso uno de los mayores avances en la historia del análisis, gran parte de la intuición original de Newton y Leibniz puede rescatarse de manera perfectamente rigurosa gracias a los infinitesimales.

PARA SABER MÁS

Si desea aprender cálculo utilizando infinitesimales, una herramienta fabulosa es el libro de H. J. Keisler **Elementary calculus: An infinitesimal approach**, un clásico publicado en 1976 y 1986 (2.ª ed.) por Prindle, Weber & Schmidt ya agotado. Una copia gratuita puede descargarse desde la página web del autor: **https://www.math.wisc.edu/~keisler/calc.html**

EN NUESTRO ARCHIVO

La secreta historia espiritual del cálculo. Amir Alexander en *IyC*, junio de 2014.



JOHN NAPIER. LIFE, LOGARITHMS AND LEGACY

Por Julian Havil. Princeton Univerity Press, Princeton, 2014.

Napier

Invención de los logaritmos

Se entiende por logaritmo la potencia a la que debe elevarse un número, llamado base, para que dé otro número. Cualquier número y puede escribirse en la forma $y = x^n$, donde n es el logaritmo en base x de y, es decir, $n = \log_x y$. Si la base es 10, tenemos logaritmos comunes. Logaritmos naturales, o neperianos, son en la base e = 2,71828...; se escribe $\log_e y$ o ln y. Los logaritmos se utilizaron como herramienta de cálculo antes que aparecieran las calculadoras electrónicas. Un logaritmo consta de dos partes: un entero y un decimal. El entero es la característica y el decimal es la mantisa. Así, el logaritmo en base 10 de 210 es 2,3222, donde 2 es la característica y 0,3222 es la mantisa.

Hasta la entrada en escena de John Napier, se fueron sucediendo diversas herramientas de cálculo: de la tableta de Salmis, en la Grecia clásica, a los cálculos romanos y el ábaco manual medieval. Desde la época de Regiomontano, en la segunda mitad del siglo xv, se habían venido construyendo tablas trigonométricas cada vez más refinadas; en particular, merced al método desarrollado entre 1505 y 1513 por Johannes Werner, que reducía la multiplicación y la división de grandes números a la adición y sustracción. Se avanzó también en las teorías de las proporciones y series, en el cálculo con potencias, lo que caracteriza el cálculo logarítmico. En particular, acababa de aparecer un mecanismo nuevo, muy elaborado, en la forma de *Prosthaphaeresis*, que emplea un par de identidades trigonométricas estándar para convertir la multiplicación en adición.

John Napier nació en Edimburgo en 1550, tres años después de perder los escoceses la batalla de Pinkie contra los ingleses. Murió en 1617. A los trece años entró en la Universidad de Saint Andrews, donde profesaba el teólogo reformista Christopher Goodman, quien le despertó el interés en el Apocalipsis de san Juan, donde veía él la prefiguración del mal en la Iglesia católica. Abandonó prematuramente la Universidad, para completar su formación en el continente, de acuerdo con lo acostumbrado en la nobleza acaudalada de su tiempo. Napier permaneció en Europa, con posible estancia en Francia, Alemania y Países Bajos, hasta 1571. Atraído por la teología y las máquinas de guerra (para reforzar la defensa de las islas británicas contra una invasión de Felipe II), estudió matemáticas por placer. Defendió las propiedades fertilizantes de las sales. Su profundización en raíces imaginarias le condujeron a desarrollar el principio del logaritmo. Pasó 20 años calculando tablas de logaritmos (en cuyo curso desarrolló también la notación decimal moderna).

A la muerte de su padre en 1608 se asentó en Merchiston al heredar el título nobiliario del lugar. Allí terminó su obra *Mirifici logarithmorum canonis descriptio*, que se publicó en 1614. Vivió y murió en un mundo agitado por convulsiones políticas y religiosas, en que coexistían sin hiato ciencia y superstición, justicia y brutalidad, religión e impiedad, vida y muerte violenta. De Napier se cuenta, sin embargo, que vivió como un eremita, entregado a sus pasiones intelectuales. A los 64 años regaló al mundo una herramienta de trabajo imprescindible para científicos y matemáticos a lo largo de más de tres siglos y medio. Las calculadoras electrónicas han acabado con las reglas de cálculo y las tablas de logaritmos en partes numéricas y partes trigonométricas.

Escrita en latín, la lengua académica del momento, la *Descriptio* constaba de 57 páginas de texto explicativo y 90 de tablas de números relacionados con los logaritmos naturales, repartido todo ello en dos libros. El libro primero, la teoría, comprendía cinco capítulos y cribaba las definiciones y reglas de operación de los logaritmos. Los seis capítulos del libro segundo estaban consagrados a diversos problemas de la trigonometría plana y esférica. Detallaba las instrucciones para su uso y ejemplos de manejo de las mismas. Ofrecía también un análisis de teoremas de trigonometría esférica (reglas de Napier de partes circulares). La noticia de la invención de los logaritmos llegó muy pronto a oídos de Henry Briggs, quien visitó a Napier en 1615. Agregaba en la *Descriptio* la promesa de publicar más tarde el método de su construcción. No vio la publicación en vida de su *Mirifici logarithmorum canonis constructio* (1619), donde expone de forma pormenorizada el método prometido. *Constructio* consta de 60 parágrafos. Lleva al lector desde materias hoy elementales, como la representación de la fracción decimal, hasta los procesos sutiles de construcción de la tabla de logaritmos incluida en la *Descriptio*. La concepción de los logaritmos va sutil e inextricablemente unida a la propiedad aditiva de los exponentes; su construcción, al uso de fracciones decimales.

Napier introdujo sin explicación el término logaritmo a partir del griego; su etimología es «número de la razón» (*lógos arithmós*). Se impuso la tarea de asignar a cada minuto de cada grado del cuadrante un número que en un comienzo llamó artificial y luego logaritmo, que permitía una manipulación fácil de los senos de los ángulos. Las tablas respondían a la necesidad de matemáticos y astrónomos de reducir los procedimientos tediosos aplicados a cálculos de funciones y ángulos. Por eso comenzaron con las tablas de senos y cosenos, con logaritmos en columnas suplementarias. Napier calculó los logaritmos de los valores de la función seno, no de los números naturales. Presentó una tabla trigonométrico-logarítmica en la que los ángulos vienen dados en intervalos de un minuto de arco. Para el «sinus totus» (sen 90º, o radio) escogió 10^7 y, por tanto, sus valores para senos se hallan entre 0 y 10^7. Su obra fue recibida con entusiasmo, pero la base que escogió no fue siempre la más conveniente, llevando a Briggs a calcular, en 1617, una tabla de logaritmos en base 10. Ese mismo año, Napier describió un sistema de barritas (el «ábaco de Napier»), dise-

ñado para la práctica de la multiplicación y división.

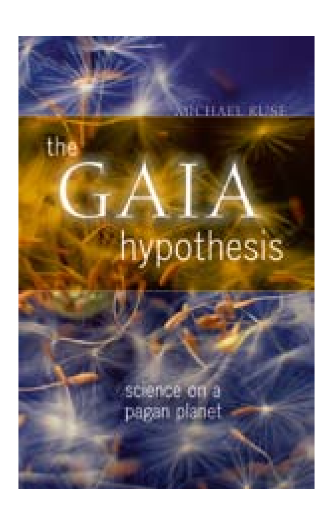
En puridad, Napier no pensó en los logaritmos de una manera algebraica. Por la sencilla razón de que el álgebra no había adquirido todavía un grado de desarrollo aceptable. Él razonaba por analogía dinámica. Sean dos líneas *AB* de longitud fija y *A'X* de longitud infinita. Los puntos *C* y *C"* comienzan moviéndose simultáneamente hacia la derecha, desde *A* y *A'*, respectivamente, con la misma velocidad inicial, que es igual a la distancia *CB*. Napier definió *A'C"* (= *y*) como el logaritmo de *BC* (= *x*).

Edward Wright y Briggs le propusieron la creación de logaritmos de base 10. Napier calculó los primeros mil números. Descubrió, además, importantes relaciones entre los elementos de los triángulos planos (teorema de Napier) y entre los elementos de los triángulos esféricos (analogías de Napier). Johannes Kepler, involucrado por entonces en el proceso tedioso de calcular las órbitas planetarias, fue en buena medida responsable de la introducción de logaritmos en el continente. Aportó valores más precisos para las series de Napier con la ayuda de proporciones sucesivas entre dos términos dados.

En 1593 publicó *A plaine discovery of the whole revelation of St John*, en la que buscaba ahondar en una interpretación numerológica de sus figuras simbólicas y de los tiempos mencionados en el Apocalipsis: los cuatro jinetes, la mujer vestida de púrpura y escarlata, el séptimo sello, el número de la bestia (666), el pozo sin fondo del abismo, Armagedón, año del principio y del fin del universo, etcétera. A lo largo del texto neotestamentario, las referencias a los intervalos temporales se dan en días, semanas y años. Un día profético es un año de calendario, una semana profética son siete años de calendario, un mes profético, treinta años calendáricos y un año profético 30 × 12 = 360 años calendáricos. Napier creía que el fin del mundo sería en 1688 o 1700. Aplicó un enfoque filosófico, una lógica basada en el silogismo aristotélico.

Pero Napier no entregó solo una herramienta poderosa a los científicos con la invención de los logaritmos. También aportó una ayuda valiosa a los que manejaban la aritmética elemental. Las varillas o «huesos» Napier facilitaban el cálculo seguro y rápido al mercader acostumbrado a un ábaco simple de cómputo. Lo expuso en su *Rabdologia seu Numerationis per Virgulas Libro Duo*, publicado en 1617.

—Luis Alonso



THE GAIA HIPOTHESIS: SCIENCE ON A PAGAN PLANET

Por Michael Ruse. The University of Chicago Press, Chicago, 2013.

Gaia

Asentamiento de una teoría controvertida

Meses después de la aparición del libro de Michael Ruse, *The Gaia hipothesis*: *Science on a pagan planet*, James Lovelock, creador de esa famosa teoría, publicaba lo que se aventura como el último capítulo de una serie de trabajos en torno a la misma, *A rough ride to the future: The next evolution of Gaia*. La idea de Gaia, avanzada hace unos 50 años, en 1965, establece que la Tierra es un sistema autorregulado: organismos y entorno físico evolucionan de forma conjunta y mutuamente retroalimentados. Los organismos, viene a decir, regulan la atmósfera en su propio interés. El nombre de Gaia se lo sugirió su amigo el novelista, y premio nóbel de literatura en 1983, William Golding, autor de *El señor de las moscas*. Se trata de una metáfora, pues la Tierra no es ningún sistema vivo, pero se comporta como si lo fuera en el sentido de que mantiene constantes la temperatura y composición química frente a las perturbaciones, aclara Lovelock.

La tesis se propone desentrañar una observación paradójica. Desde la formación del sistema solar, hace más de 4000 millones de años, la energía que el astro emite, en razón de su propia combustión interna, ha venido aumentando, hasta triplicarse, con el paso del tiempo. Pero la temperatura de la superficie de la Tierra ha permanecido casi constante, con una variación máxima de 10 grados Celsius en torno a la media actual. Que eso se deba al mero azar parece muy cuestionable. Antes bien, todo indica que la temperatura y otras características singulares de nuestra atmósfera derivan de una principal que llamamos homeostasis. En su obtención, los organismos desempeñarían una función positiva. La atmósfera terrestre se mantiene y regula por la vida, por la biosfera.

En una serie de artículos publicados por la revista *Nature* sobre nociones fundamentales de la ciencia, en el dedicado a Gaia, aparecido en diciembre de 2003, Lovelock se imagina una civilización de una galaxia lejana que hubiera desarrollado un interferómetro de un poder de resolución tal, que pudiera analizar la composición química de la atmósfera terrestre. A partir de ese análisis podría extraer la conclusión de que la Tierra, dotada de peculiaridades únicas dentro del elenco de planetas en torno al Sol, poseería vida basada en el carbono y un desarrollo industrial. Habría detectado metano y oxígeno en la atmósfera superior. Sus químicos hubieran sabido que se trataba de gases que se consumen y reemplazan sin solución de continuidad. Que eso suceda por obra de una química inorgánica aleatoria es harto improbable. Semejante desequilibrio, persistente, en la atmósfera, revela una baja entropía característica de la vida. Deducirían las características de un planeta vivo, habitado. La presencia de gases de invernadero en la atmósfera se debería a una industria tosca, por domeñar, pues los dejaba escapar. La vida, que precisa tales condiciones ambientales, contribuye a su persistencia.

Lovelock entiende que nuestra evolución cultural, basada en la información,

supera en cuantía sustancial la celeridad con que operaba la selección natural antaño. Remonta esa transición a la invención en 1712, por Thomas Newcomen, de la máquina de vapor. La capacidad de ese ingenio, activado por carbón, para producir un trabajo sostenido, de más de 1 kilovatio, constituía el punto de arranque (termodinámicamente hablando) del Antropoceno, época planetaria caracterizada por la transformación impulsada por el hombre. Alimentada esa tendencia por combustibles fósiles, las retroalimentaciones subsiguientes positivas impulsaron un desarrollo exponencial de flujo de materia, población humana y procesamiento de la información. La hipótesis Gaia toma el bien del conjunto como la fuerza motriz fundamental; en numerosas ocasiones las cosas no existen ni se comportan en propio beneficio, sino en beneficio del todo. Las plantas producen el oxígeno del que viven los animales.

Ahora bien, la innovación humana constituía solo la última de una larga línea de innovaciones biológicas que cambiaron la faz de la Tierra. Por ejemplo, hace unos 3000 millones de años, las bacterias fotosintéticas adquirieron capacidad de disociar el agua, hazaña que posibilitó la formación de una atmósfera terrestre de oxígeno. Tal capacidad innovadora resultó crucial para la configuración actual del planeta y sería decisivo para la supervivencia de la vida y la de Gaia.

Aunque el concepto de una Tierra viva es antiguo, debemos a Newton la comparación del planeta con un animal o un vegetal. Hutton, Huxley y Vernadsky expresaron puntos de vista similares, mas, al carecer de datos cuantitativos, esas ideas pioneras se quedaron en la anécdota o meras declaraciones. En 1925, Alfred Lotka pensó ya que le resultaría más fácil modelar la evolución de un organismo y de su entorno material como si integraran una sola unidad que si se hiciera con cada uno de ellos por separado. Gaia anclaba sus orígenes en esos precedentes y se basaba en las pruebas compiladas por los bioquímicos Alfred Redfield y Evelyn Hutchison.

Lovelock iría depurando su propuesta. En 1981 creó un modelo de plantas de colores oscuros y claros que competían en un planeta de creciente irradiación de luz solar. Se trataba de mostrar que la hipótesis Gaia era coherente con la selección natural. Un año después, James Walker, P. B. Hayes y Jim Kasting sugirieron que la erosión de rocas de silicato de calcio podían regular el dióxido de carbono y el clima. Un mayor calentamiento provocaba mayor pluviosidad y más rápida sustracción de dióxido de carbono de la atmósfera por la erosión de las rocas, lo que aportaba un efecto de retroalimentación negativa. Ahora bien, por sí solo, este mecanismo no podría explicar la tasa observada de erosión. Es ahí donde intervienen los organismos de las rocas y del suelo como mecanismo de Gaia; su desarrollo varía con la temperatura y su presencia potencia la tasa de erosión. En 1986, Robert Charlson, Lovelock, Meinrat Andreae y Steven Warren descubrieron el nexo que existe entre el gas biogénico dimetil-sulfuro (producido por algas oceánicas), su oxidación en la atmósfera para formar núcleos de condensación nebulares y el efecto subsiguiente de creación de nubes.

Lynn Margulis (1938-2011), cocreadora de la teoría Gaia desde 1971 y autora de *The symbiotic planet*, aportó al modelo la función desempeñada por los microorganismos, que constituyen la infraestructura biológica de la Tierra. Si durante buena parte de la historia del planeta ocuparon todos los espacios de la biosfera, en nuestro tiempo resultan también vitales para una regulación eficaz de la misma. En efecto, los microorganismos del suelo son los responsables de la producción de gases que encontramos en la atmósfera; el vapor de agua, el dióxido de carbono y el amonio reducen la pérdida de radiación de la Tierra al espacio, merced a su absorción infrarroja. Nos referimos al efecto invernadero, en virtud del cual la atmósfera mantiene al planeta bastante más cálido de lo que estaría de suyo. Todo indica que en los primeros estadios de la Tierra el efecto invernadero desempeñó una misión principalísima, que ha ido disminuyendo conforme el Sol iba enviando más calor. Pero no perdamos de vista que los gases decisivos del efecto invernadero son producidos por los organismos.

Pocos filósofos de la ciencia han sabido fundir historia y filosofía de la ciencia, de la biología en particular, con el acierto con que lo ha hecho Michael Ruse. En este fino análisis de la hipótesis de Gaia, Ruse aplica su habilidad a la disección de un caso controvertido en que la ciencia, la pseudociencia y la religión convergen. Sitúa la teoría de Lovelock y Margulis sobre la Tierra como ser vivo autorregulado dentro de varios contextos: desde biografías personales hasta la historia del mecanicismo y del organicismo de las ciencias biológicas. Toma a Gaia como pretexto para una larga lucubración histórico-filosófica de las ideas sobre la vida a lo largo del tiempo en Occidente. Se propone con ello mostrar que el pensamiento sobre cuestiones empíricas viene condicionado por el pasado; creencias y, sobre todo, diferencias, no emergen de la nada. La forma en que conocemos hoy es deudora del modo en que se pensaba hace tiempo. Lo que no significa que no se produzcan cambios rápidos y profundos en la ciencia en especial y en la cultura en general.

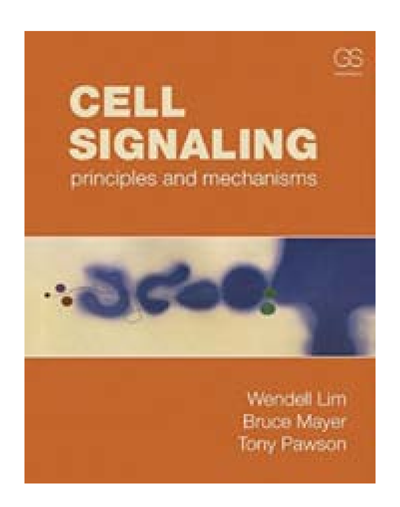
Que la Tierra era un planeta vivo era una idea de muy larga historia en el pensamiento occidental, en realidad desde el origen de la reflexión científica en la Jonia mediterránea. Se relaciona con la teleología o finalidad del cosmos y su contenido. Platón percibió una suerte de diseño en un mundo que distaba mucho de un caos que se moviera sin razón ni cuenta, ciego. La complejidad manifiesta no podía ser fruto del azar, sino que debía subyacer en todo un sentido y una finalidad. Las cosas tienen una explicación finalista, impuesta desde el exterior, por el demiurgo que la ideó. La finalidad convergía con el bien del objeto o del proceso, expone en el *Timeo*. Aristóteles, su discípulo, da un paso más e implanta la finalidad en el propio objeto u organismo. Los animales, por ejemplo, carentes de razón, actúan por un fin, que es el que les viene conferido por su propia naturaleza. Distinguió entre causas próximas (el escultor que cincela la figura y va eliminando trozos de mármol) y el propósito o finalidad que guía al escultor en la talla: la creación de la figura. Por imperativo de la naturaleza y con un propósito construye la golondrina el nido y teje la araña su red, dan las plantas frutos y hunden sus raíces en el suelo en busca de nutrimento. Con la revolución científica se empezó a separar con nitidez la labor del científico, centrada en el mecanismo, en el cómo, de la tarea del filósofo, ocupado en el porqué. Para Kant podríamos considerar el mundo vivo como si reflejara un diseño, aunque se escapara de la labor del científico.

En la teoría Gaia participan de forma destacada la geología y la biología evolutiva, investigadas desde un enfoque mecanicista. La geología es una ciencia empírica. Levanta mapas y descubre la constitución del planeta. La teoría subyacente inició su andadura a finales del

siglo XVIII con James Hutton, quien hablaba de una Tierra muy vieja conformada a través de ciclos de erupción volcánica y erosión. A la tesis vulcanista le sucedió la teoría uniformitarista de Charles Lyell; en su opinión, el tiempo encerraba la clave del devenir geológico: el cambio geológico operado a lo largo de los siglos podía explicarse con los parámetros de cambio que contemplamos ahora, a saber, lluvia, erosión, sedimentación, volcanes y terremotos. Por su parte, en la biología darwinista, la selección natural opera mediante una adaptación mecanicista en términos de economía.

Mecanismo es la metáfora que remite al proceder propio de una máquina y declara que el mundo se guía por unas leyes y unas constantes universales. El mecanicismo se halla asociado al reduccionismo o la explicación del todo por sus unidades componentes. Del mecanicismo se separa el organicismo emergentista, tesis que sostiene que el todo, aunque emerge de las partes, no se explica por estas. Las entidades conformadas muestran armonía y equilibrio, algo que vale la pena. Si el biólogo mecanicista se muestra propenso a la selección individual, el organicista se manifiesta proclive a la selección de grupo (poblaciones, especies), cuyo beneficio trasciende la ventaja reportada a diferentes individuos. En el emergentismo confesaba militar Margulis, quien, alejándose de posturas reduccionistas, declaraba que los sistemas autopoyéticos producen y mantienen sus propios límites, sin otra finalidad que la interna de corte aristotélico.

—Luis Alonso



CELL SIGNALING. PRINCIPLES AND MECHANISMS

Por Wendell Lim, Bruce Mayer y Tony Pawson. Garland Science. Taylor & Francis Group; Nueva York, 2015.

Señalización celular

Sistema interno de comunicación

Poder percatarse de cuanto existe y sucede a su alrededor, para actuar en consecuencia, constituye una de las propiedades distintivas de todos los seres vivos. Las células, unidades fundamentales de la vida, se definen por su capacidad para percibir los estímulos externos y responder a ellos de una manera dinámica. Esa capacidad para recibir información y procesarla con la consiguiente toma de decisiones se asimila a los principios de ingeniería y arquitectura de otros sistemas procesadores de información que rigen los circuitos electrónicos creados por el hombre. En la interfaz entre las propiedades exclusivas de los sistemas vivos y las propiedades más universales de todo sistema que procesa información reside el atractivo del estudio de los mecanismos de señalización celular.

En razón de las condiciones del entorno, los organismos unicelulares absorben nutrientes, evitan toxinas y cambian de forma, expresión génica y metabolismo. En las plantas y animales pluricelulares, se requieren interacciones mucho más complejas entre células y medio exterior. Las células reciben e integran una vasta cantidad de información y la utilizan para tomar decisiones sobre cómo desarrollarse, dividirse, emigrar, adoptar una forma peculiar e incluso morir. Sin tales decisiones, el organismo no podría ni desarrollarse, ni mantener su integridad como entidad viva coherente.

La transmisión de señales en el seno de la célula, entre células y desde el entorno extracelular hacia el interior de la célula constituye un fenómeno crucial para la vida. De la transmisión en todos esos ámbitos se encargan proteínas de señalización, que tejen redes complejas. A su vez, las redes se articulan en largas cadenas en serie, que crean numerosas vías paralelas; por su parte, las trayectorias toman caminos dispares a partir de una misma información común, convergen en nodos intermedios y vuelven a separarse en múltiples efectores. A diferencia de los sistemas ordenados de cables, transistores y demás componentes de las entrañas de los ordenadores y otras máquinas, los mecanismos celulares que procesan las señales constan de una maraña, densamente empaquetada y confinada por una membrana impermeable al agua, de proteínas, lípidos, hidratos de carbono, ácidos nucleicos y otras biomoléculas. Pero el animal de carga del procesamiento son las proteínas, enormemente versátiles en lo que se refiere a los tipos de estructura física que pueden adoptar y en lo concerniente a las reacciones químicas que pueden llevar a cabo. Las enzimas catalizan las reacciones bioquímicas y aportan la base para el metabolismo energético, la replicación, la motilidad y otros comportamientos asociados con la vida. Lípidos, ácidos nucleicos y otros desempeñan un papel de soporte.

Podemos imaginarnos la transferencia de información como una serie de conmutaciones o nodos que pueden cambiar de estado en respuesta a señales de entrada; cuando un nodo cambia de estado, se genera una señal de salida. En la señalización celular, las unidades básicas de información son los cambios de estado de las proteínas. Una proteína ejerce una actividad u otra según experimente o no determinada modificación química (fosforilación de una cadena lateral, por ejemplo). Quizá la proteína no modificada es inactiva (*off*) y la forma fosforilada es activa (*on*). El estado de esta proteína se cambia por información (*input*) procedente de otras proteínas que pueden añadir un grupo fosfato o eliminarlo. En este ejemplo, podemos pensar en enzimas que añaden fosfato (proteína cinasas) y enzimas que eliminan esas marcas (proteína fosfatasas).

No es fácil desenredar la madeja, acotar una señal específica en redes complicadas, ni entender de qué manera ese conjunto de moléculas, genéticamente codificado, puede manejar información compleja y regular la función celular. La señalización celular es ubicua, doquiera que miremos. Se conocen varios miles de proteínas de señalización entre los

mamíferos y más de una quincena de segundos mensajeros involucrados en la construcción de sistemas especiales de señalización.

Se forman bucles de realimentación: avanzado el procesamiento de la información, las redes reguladoras presentan componentes que aportan información a los componentes que operan en una fase anterior de la trayectoria. Los bucles de realimentación son procesos que ponen en conexión las señales de salida con la información de entrada. La historia de la realimentación biológica se remonta a 1877, cuando Eduard Pflüger observó que los órganos y otros sistemas satisfacían sus propias necesidades. El desarrollo de esa idea llevó a la teoría de la homeostasis fisiológica, propuesta por Walter Cannon en 1929. Influyó también en Alan Turing y su modelo de formación de patrones, publicado en 1952, en las investigaciones sobre inhibiciones del producto final metabólico y en la autorrepresión de la transcripción. A su vez, sobre los conceptos de realimentación biológica dejaron sentir su peso las teorías sobre oscilación química y el campo de la cibernética. Entender de qué modo unas moléculas sencillas interaccionan específicamente para formar un sistema con propiedades de respuesta emergentes constituye el quid de la señalización celular.

Los bucles se caracterizan por adquirir fuerza suficiente para alterar las propiedades de una vía bioquímica y su respuesta ante los estímulos. Para entender esos sistemas de regulación y sacarles partido convirtiéndolos en diana de estrategias terapéuticas precisamos información cuantitativa sobre el flujo de las señales a lo largo de la vía, así como pistas sobre la secuencia temporal y localización de los puntos de señalización en el interior celular. Por mor de ejemplo, necesitamos explorar las propiedades que determinan si un sistema expresa una respuesta gradual ante un estímulo o si actúa a la manera de un conmutador, cuánto tiempo persiste activada una vía, si los resultados oscilan, si pueden moldearse los componentes con el fin de controlar dichos resultados, etcétera. A lo largo de los últimos años se ha experimentado un notable progreso en el conocimiento de las redes de interacción que actúan como vías de comunicación para la señalización celular, culminando con mapas extensos de «interactomas», basados en datos de interacción genética y física. Resultado de tan compleja conectividad es el control del transporte de membrana, metabolismo celular, traducción de proteínas, conformación y emigración celular, transcripción génica, ciclo celular y supervivencia de la célula.

Las señales procedentes del mundo exterior, detectadas en la membrana, se trasmiten a través del citoplasma, con bucles de realimentación y de prospección en núcleo y orgánulos. Se han venido acumulando pruebas de que la señalización se apoya sobre propiedades dinámicas de las proteínas. Estas transmiten las señales cambiando entre diferentes estados fluctuantes de energía en respuesta a uno o varios estímulos. Los movimientos internos de las proteínas vienen determinados por fuerzas covalentes y no covalentes que las mantienen unidas. Se produce así una sinfonía de modos dinámicos que oscilan a frecuencias que van de los picosegundos a los milisegundos e incluso a los segundos. Las estructuras de una proteína, privilegiadas desde el punto de vista energético, con sus propiedades dinámicas, incluidas las amplitudes y frecuencias de fluctuación entre estados, se hallan codificadas en su secuencia y se encuentran sometidas a presión evolutiva.

Conviene asentar qué tipos de estímulos excitan la célula, es decir, promueven su reacción de respuesta. Los más comunes, que afectan por igual a organismos unicelulares de vida libre y a las células de organismos pluricelulares, son los nutrientes y otras materias primas; también las tensiones del medio. En el caso de los nutrientes, la célula se aprovecha del entorno si los contiene o se desplaza hacia otros puntos de mayor riqueza. Los estímulos físicos o químicos pueden provocar que la célula emigre o se adapte para medrar en un momento duro hasta que mejoren las condiciones. Una célula de levadura, por ejemplo, que se encuentre con deficiencia de fosfato, despliega una respuesta compleja que consiste en reducir al mínimo el consumo de fosfato, potenciar el transporte de fosfato y segregar enzimas (fosfatasas) para liberar fosfato a partir de fuentes ambientales.

En los organismos pluricelulares se requiere la detección de un nuevo conjunto de señales por cada una de las múltiples células que integran órganos y tejidos. Ello permite que las células trabajen coordinadas, a modo de una entidad integrada, en vez de actuar cada una por su cuenta y riesgo. Esas señales locales incluyen soluciones solubles que se difunden hasta distancias muy cortas, señales que se hallan ancladas en la superficie de la célula y solo pueden ser detectadas por las células con las que se encuentran en contacto directo. También se segregan, y se transportan a través del organismo, señales de largo alcance, de muy diversos tipos; merced a ello, las células distantes pueden desenvolverse al unísono.

La actividad de las enzimas de señalización se halla frecuentemente regulada por cambios alostéricos en la conformación inducida. Los *inputs* más frecuentes que inducen un cambio conformacional son la unión con el ligando y la modificación subsiguiente a la traducción. Esta última aporta una solución rápida y eficiente para cambiar la actividad de las proteínas. La adición y remoción de esas modificaciones están catalizadas por enzimas específicas. El alto número de sitios posibles de modificación, sumado a la diversidad de modificaciones posibles multiplica enormemente el número de estados potenciales de las proteínas, más allá de lo que puede cifrar el genoma.

Compete a las células vigilar sin solución de continuidad el estado interno para ajustarse a las circunstancias y reparar los daños. La palabra homeostasis define la capacidad de los sistemas vivos de ajustar su comportamiento de manera espontánea para mantener un medio intracelular estable, no obstante las condiciones cambiantes del medio. Aunque ello pueda parecer la antítesis de la adaptabilidad, en realidad es otra manifestación de la capacidad de detectar cambios en las condiciones y modificar la actividad celular de acuerdo con los cambios experimentados.

Para mantener el complejo medio molecular interior, los sistemas celulares de señalización tienen que responder ante cualquier información que llegue, por tenue que sea. Basta a veces una molécula incitante, una hormona, por ejemplo, para inducir un cambio general en la célula receptora de la señal, poniendo en tensión el equilibrio entre la vida y la muerte, entre quiescencia o tanda de división celular. Esa capacidad demostrada de amplificar la señal incidente adquiere un redoblado interés si reparamos en que el sistema ha de oponerse a un ruido de fondo plural (fluctuaciones aleatorias de la conformación, de la actividad o de la concentración local de componentes celulares).

— Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Abril 1965

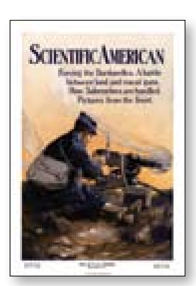
Un modelo económico

«El desarrollo ulterior del análisis de insumo-producto y la consciencia de su importancia para una toma de decisiones informada y racional en todos los niveles de la actividad económica hacen necesarias unas tablas detalladas y más actualizadas. La comparación de las tablas de insumo-producto de EE.UU. entre los años 1947 y 1958 revelan cambios importantes en los coeficientes de insumo-producto debidos a las innovaciones tecnológicas. Ya se han iniciado los trabajos preparatorios de una tabla basada en datos del censo de la producción industrial de 1963. —Wassily W. Leontief»

Por este trabajo Leontief ganó en 1973 el premio de Ciencias Económicas del Banco de Suecia en memoria de Alfred Nobel.

Antídoto de la heroína

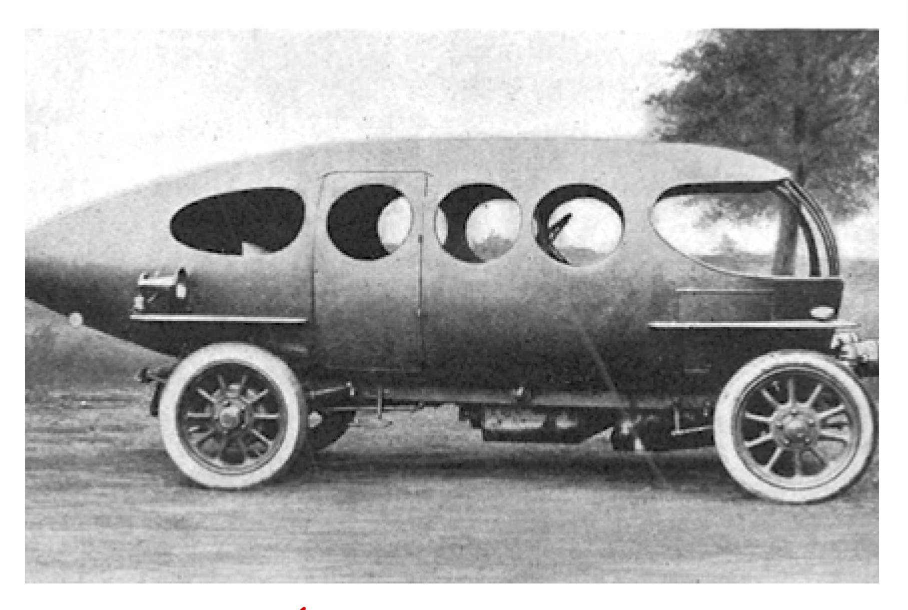
«Vincent P. Dole, del Instituto Rockefeller, ha informado de unos resultados prometedores a raíz de experimentos con un fármaco que satisface la necesidad fisiológica de los adictos y a la vez bloquea la euforia concomitante. Dole ha hecho que a varios adictos a la heroína, hospitalizados en el Instituto, se les administre metadona, un fármaco que reduce el síndrome de abstinencia. La metadona no produce la sensación de euforia provocada por la heroína; de hecho, una dosis de metadona lo bastante fuerte hace que la siguiente administración de heroína carezca del efecto estimulante. De este modo, un adicto que reciba metadona no experimentará euforia, pero tampoco sufrirá la angustia que suele asociarse a esa privación. Se trata de un compuesto desarrollado en Alemania hace más de 25 años y que hoy se emplea en Europa como analgésico.»



Abril 1915

Diseño aerodinámico

«El automóvil de tan extraordinario perfil que se muestra en la ilustración adjunta ha sido construido en Italia, conforme a los diseños del conde Marco Ricotti, de Milán, según se informa. Como se comprenderá fácilmente, ha hecho avanzar aún más hacia su conclusión final las ideas acerca de la carrocería aerodinámica. El automóvil de Ricotti está equipado de un motor de cuatro cilindros de 50 caballos de potencia, lo cual permite a este torpedo con ruedas moverse por el suelo a la elevada velocidad de unos 130 kilómetros por hora. Si se retira la carrocería aerodinámica y se deja que el vehículo corra "en chasis", la velocidad se reduce de inmediato a poco más de 100 kilómetros por hora. Teniendo en cuenta el considerable peso de la carrocería, ello debe tomarse como una extraordinaria demostración de la influencia del viento a grandes velocidades.»



PROTOTIPO AERODINÁMICO: Automóvil de turismo y de carreras, de ALFA (posteriormente, Alfa Romeo), 1915. Obsérvese la posición retrasada del volante.

Una ciudad de película

«En el corazón del Valle de San Fernando, en el estado de California, hay una prodigiosa ciudad que acaso sea la más extraordinaria de todas las del mundo. Su nombre es Universal City y es el único municipio del planeta dedicado a la manufactura de películas de cine. Fue oficialmente inaugurada el 15 de marzo y la totalidad de sus 1500 habitantes están empleados en el arte de hacer películas. Es algo así como una ciudad camaleón, puesto que todo su color y aspecto pueden cambiar en tres días para adaptarse a los de cualquier nacionalidad, estilo arquitectónico, colorismo local o estado de conservación, según requiera la ocasión.»



Abril 1865

Fin de la guerra, muerte de Lincoln

«Una terrible y abrumadora desgracia ha acaecido en el país. El Primer Magistrado ha sido abatido por la mano de un asesino. El pueblo, como un solo hombre, está horrorizado ante la magnitud de la pérdida. En la pleamar de la victoria, en el apogeo del júbilo por haber logrado aplastar la rebelión, nuestra bandera se tiñe de luto, llueven cenizas sobre los laureles, los gritos de alegría se tornan en llantos de dolor... El hondo pesar que se refleja en los rostros de la gente demuestra cuán querido nos era el hombre sencillo, honrado y noble que hasta hace poco nos guiaba. Prudente en sus juicios, inflexible en sus decisiones, magnánimo con sus enemigos, sin tacha ni en lo público ni en lo privado, la historia no registrará en sus páginas un nombre más luminoso que el de ABRAHAM LINCOLN.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXII, N.º 15, 10 DE ABRIL DE 1915



EVOLUCIÓN HUMANA

La mente neandertal

Kate Wong

Los estudios anatómicos, genéticos y arqueológicos arrojan luz sobre la forma de vida de nuestros enigmáticos primos evolutivos.

ATTOFÍSICA

Interruptores accionados por impulsos de luz

Martin Schultze y Ferenc Krausz

El procesamiento electrónico de señales se hace cada vez más rápido. Las dificultades técnicas con que topa el desarrollo de los nuevos componentes podrían superarse mediante pulsos láser ultracortos.

MEDICINA

Combatir el dolor crónico

Stephani Sutherland

Nuevos hallazgos sobre las causas del dolor abren vías para el desarrollo de analgésicos más eficaces.



CAMBIO CLIMÁTICO

La adaptación de las islas

Simon D. Donner

Usar la isla de Kiribati como símbolo de la devastación causada por la subida del nivel del mar no solo lleva a error; quizás hasta resulte perjudicial.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *La batalla contra el ébola*; Jose H. Villegas: *Apuntes*; Juan Manuel González Mañas: *Erradicación de la memoria celular en embriones humanos*; Tomás Ortín: *Agujeros negros y muros de fuego*; Yago Ascasibar: *Minería de agujeros negros*; Olivia Potel: *Nueva mirada a las plantas medicinales*; Xavier Roqué: *Mujeres y ciencia en la España de la Ilustración*; Marián Beltrán: *La historia de un dios maya*; Javier Grande: *Veinticinco años del Hubble*; Juan Pedro Adrados: *El mundo programable*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España